

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

DISSERTAÇÃO

**ESTUDO DA SEDIMENTAÇÃO DE SÓLIDOS ADENSANTES BASEADO NA TÉCNICA DE
MONITORAMENTO DA PRESSÃO HIDROSTÁTICA**

JULIANA MARIANO DE SOUZA

2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ESTUDO DA SEDIMENTAÇÃO DE SÓLIDOS ADENSANTES BASEADO NA TÉCNICA DE
MONITORAMENTO DA PRESSÃO HIDROSTÁTICA**

JULIANA MARIANO DE SOUZA

Sob a orientação da professora

Dra. Cláudia Miriam Scheid

e Co-orientação de

Dr. Luís Américo Calçada

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Química** no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Área de Concentração em Tecnologia Química.

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

SS719e
e Souza, Juliana Mariano de, 23/12/1988-
ESTUDO DA SEDIMENTAÇÃO DE SÓLIDOS ADENSANTES
BASEADO NA TÉCNICA DE MONITORAMENTO DA PRESSÃO
HIDROSTÁTICA / Juliana Mariano de Souza. - VOLTA
REDONDA, 2024.
135 f.: il.

Orientadora: Cláudia Miriam Scheid.
Coorientadora: Luís Américo Calçada.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA QUÍMICA, 2024.

1. Sedimentação. 2. Pressão. 3. Monitoramento. 4.
Fluidos de Perfuração. I. Miriam Scheid, Cláudia ,
1968-, orient. II. Américo Calçada, Luís, 1966-,
coorient. III Universidade Federal Rural do Rio de
Janeiro. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA. IV. Título.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 “This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001”.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

JULIANA MARIANO DE SOUZA

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Química** no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Área de Concentração em Tecnologia Química.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 28 / 02 / 2024

Prof. Dra. Cláudia Miriam Scheid, DEQ/UFRRJ

(Orientadora)

Prof. D. Sc. Bruno Francisco Oechsler, EQA/UFSC

Prof. D. Sc. Cristiano Agenor Oliveira de Araujo, DEQ/UFRRJ

AGRADECIMENTOS

Nesses anos de mestrado foram grandes os desafios, mas venho agradecer primeiramente a Deus, que esteve ao meu lado em todos os momentos, me guiando, me dando a oportunidade, a força, o discernimento e a coragem para superar todos os obstáculos que foram encontrados ao longo do caminho. E assim eu entreguei a minha jornada ao senhor e pude perceber o quão grande foi a vitória.

A minha família eu tenho uma enorme gratidão aos meus pais, Silvio e Iracema, a minha irmã Leticia e minha prima Ludmila, por todo apoio, paciência, compreensão e ajuda. Sem eles não teria finalizado, o incentivo foi primordial para que pudesse ter chegado até aqui, mesmo querendo desistir em alguns momentos.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, aos professores, aos técnicos e aos servidores tenho minha eterna gratidão. Obrigado por terem contribuído para a execução do trabalho e me acolhido tão bem em um local totalmente diferente para mim.

Expresso em especial a minha gratidão a orientadora Cláudia Miriam Scheid, pela atenção, carinho, apoio, orientação, preocupação e dedicação. Obrigada por ter me ajudado a conduzir tão bem e com maestria a jornada acadêmica. Também tenho a enorme gratidão pelo professor Luís Américo Calçada que colaborou de forma imprescindível para o desenvolvimento do curso e do trabalho.

Aos amigos que conheci muito obrigada pelos ensinamentos, pela colaboração e apoio. Alguns aqui eu cito com muito carinho e amor que são a Caroline, Ramon e Marcus. Mas tem uma pessoa muito especial que além desses eu também quero levar para a vida, o Allan. Meu amigo obrigado por não ter soltado a minha mão e por ter me levantado quando eu mais precisei.

A equipe técnica do Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani (LEF) agradeço pelos valiosos ensinamentos e pelos incansáveis esforços para me auxiliarem. Então o meu muito obrigada vai para o Moacyr, Thalles, Eduardo, Vinicius, Diogo, Ricardo, Keven Kamila, Elias, Jorge, André, a Fernanda (mesmo sendo de outro laboratório).

Manifesto, a minha profunda gratidão à PETROBRAS pelo apoio financeiro, indispensável para a concretização deste projeto.

RESUMO

Os fluidos de perfuração são suspensões circulantes que facilitam e contribuem para a construção do poço de petróleo. São misturas complexas, de base aquosa ou oleosa, e podem conter material orgânico, sais dissolvidos e sólidos em suspensões, chamados de adensantes. No processo de estruturação do poço, o fluido de perfuração pode ficar confinado por anos no espaço anular formado entre dois revestimentos ou entre o revestimento e a formação rochosa. Devido à gravidade, o material adensante sofre um processo de sedimentação que pode afetar a segurança do poço na etapa da produção do óleo. Compreender esse processo ajudará a prever a altura de sedimento formado no fundo do anular e como isso pode impactar a pressão na região anular. Dentro deste contexto, a pesquisa foca em uma abordagem alternativa para monitorar a concentração de sólidos durante o processo de sedimentação. A estratégia é utilizar transmissores de pressão para realizar leituras de pressão em diferentes alturas de uma coluna de sedimentação. Com este objetivo, foram construídas três unidades distintas para a realização dos testes experimentais: Unidade I e II de Bancada, ambas cilíndricas e feitas em acrílico, e uma Unidade Piloto, cilíndrica e construída em aço comercial. Essas unidades apresentam alturas diferentes, com a Unidade I medindo 97,25 cm, a Unidade II 160 cm e a Unidade Piloto, a maior, com 400 cm. Os fluidos preparados foram de base aquosa e utilizavam como adensante barita e calcita em diferentes concentrações volumétricas. Os resultados indicaram que é possível detectar a passagem da interface de sedimentação em alguns pontos de medição, especialmente os próximos ao topo da coluna. O sistema de medidas de pressão permitiu também acompanhar os perfis de concentração ao longo da coluna e os diferenciais de pressão possibilitaram o entendimento da dinâmica de sedimentação nas regiões entre as tomadas de pressão. Os estudos viabilizaram ainda a análise da propagação da pressão no sedimento compactado no fundo da coluna, oferecendo informações sobre transmissibilidade de pressão no meio poroso. A utilização de colunas com diferentes alturas forneceu uma compreensão da sedimentação em diversas escalas. De maneira geral, o acompanhamento do processo de sedimentação por meio do diferencial de pressão emerge como uma alternativa viável, demonstrando capacidade de detectar a passagem da interface e variações de concentração em regiões específicas.

Palavras-chave: Sedimentação, Pressão, Monitoramento, Fluidos de Perfuração.

ABSTRACT

Drilling fluids are circulating suspensions that facilitate and contribute to the construction of the oil well. They are complex mixtures, water or oil based, and can contain organic material, dissolved salts and solids in suspensions, known as weighting agents. In the process of structuring the well, the drilling fluid can be confined for years in the annular region formed between two casings or between the casing and the rock formation. Due to gravity, the weighting agents undergo a sedimentation process that can affect the safety of the well at the oil production stage. Understanding this process will help predicting the height of sediment formed at the bottom of the annulus and how this can impact the pressure in the annular region. Within this context, the research focuses on an alternative approach to monitoring the concentration of solids during the sedimentation process. The strategy is to use pressure transmitters to take pressure readings at different heights in a sedimentation column. To this end, three different units were built to carry out the experimental tests: Bench Unit I and II, both cylindrical and made of acrylic, and a Pilot Unit, cylindrical and made of commercial steel. These units have different heights, with Unit I measuring 97.25 cm, Unit II 160 cm and the Pilot Unit, the largest, 400 cm. The fluids prepared were water-based and used barite and calcite in different volumetric concentrations as weighting agents. The results indicated that it is possible to detect the passage of the sedimentation interface at some measurement points, especially those near the top of the column. The pressure measurement system also made it possible to follow the concentration profiles along the column and the pressure differentials made it possible to understand the sedimentation dynamics in the regions between the pressure taps. The studies also made it possible to analyze the propagation of pressure in the compacted sediment at the bottom of the column, providing information on the transmissibility of pressure in the porous medium. The use of columns with different heights provided an understanding of sedimentation at different scales. Overall, monitoring the sedimentation process using pressure differential emerges as a viable alternative, demonstrating the ability to detect interface passage and concentration variations in specific regions.

Keywords: *Sedimentation, Pressure, Monitoring, Drilling Fluids.*

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1:** Plano estratégico para produção e exploração de petróleo desenvolvido pela Petrobrás para os anos de 2024 – 2028. Fonte: PETROBRÁS, 2023.....01
- Figura 1.2:** Sistemas da sonda de perfuração. Fonte: HOWSTULFWORKS, 2021.....02
- Figura 1.3:** Variações de densidade resultante da sedimentação de sólidos. Fonte: MOHAMED, 2019.....03
- Figura 1.4:** Tubulação colapsada no poço Pompano A-31. Fonte: PATTILLO; COCALES; MOREY, 2004.....04
- Figura 1.5:** Representação esquemática de um poço de petróleo com sapata aberta, onde A e C são os fluidos de perfuração e B o revestimento. Fonte: AUTOR, 2023.....05
- Figura 2.1:** a) curva de escoamento, tensão versus deformação; b) curva de viscosidade. Fonte: FAGUNDES, 2019.....09
- Figura 2.2:** Curva reológica de fluidos não newtonianos e newtoniano. Fonte: CHHABRA e RICHARDSON, 2008.....10
- Figura 2.3:** Curva reológica de uma solução polimérica. Fonte: CHHABRA e RICHARDSON, 2008.....11
- Figura 2.4:** Testes em proveta para análise da interface no processo de sedimentação, ensaios em batelada. Fonte: COE, CLEVINGER,15
- Figura 2.5:** Curva de sedimentação em batelada, com linhas de propagação da equi-concentração. Fonte: KYNCH, 1952.....18
- Figura 2.6:** Imagens da sedimentação de partículas obtidas por ressonância magnética de um fluido newtoniano (A) e fluido viscoelástico (B). Fonte: BOBROFF e PHILLIPS, 1988.....20
- Figura 2.7:** Suspensões em sedimentação em soluções de goma Xantana a 1500 ppm. Fonte: DAUGAN et al. 2004.....21
- Figura 2.8:** A) Regiões I, II e III da sedimentação em batelada delimitadas pelas discontinuidades: interface descendente e interface ascendente. B) Modelo de d'Ávila, Fonte: AROUCA, 2007.....27
- Figura 2.9:** Interfaces ascendente e descendente. Fonte: Adaptado de TILLER, 1981.....29
- Figura 2.10:** Representação esquemática das zonas de sedimentação. Fonte: Adaptado de FRANÇA, MASSARANI e BISCAIA Jr, 1999.....31
- Figura 2.11:** Regiões de sedimentação adotadas por Rocha (2018) com base nas zonas de sedimentação estudadas por Kynch. Fonte: ROCHA, 2018.....35

Figura 2.12: Teste de proveta graduada para avaliar a sedimentação com fluidos contendo Calcita e Barita. Fonte: AUTOR, 2023.....	39
Figura 2.13: Curva de sedimentação representando o deslocamento da interface superior com o tempo. Fonte: MESSIAS Jr., 2016.....	40
Figura 2.14: Ilustração esquemática da atenuação de raios gama em uma coluna de sedimentação. Fonte: AROUCA, 2007.....	41
Figura 2.15: Unidade de aplicação de radioisótopos. Fonte: FAGUNDES, 2015.....	42
Figura 2.16: Planta piloto de sedimentação em batelada projetada e operada no Instituto de Controle Automático. Fonte: NOCÓN, 2010.....	43
Figura 2.17: Diagrama da planta piloto de sedimentação. Fonte: NOCÓN, 2010.....	44
Figura 2.18: Resultado típico obtido no estudo realizado por Nocón (2010). Fonte: NOCÓN, 2010.....	44
Figura 2.19: Representação esquemática do aparato experimental. Fonte: PASQUINI <i>et al.</i> 2023.....	46
Figura 2.20: Concentração ao longo do tempo para todos os testes realizados. Fonte: PASQUINI <i>et al.</i> 2023.....	47
Figura 2.21: Monitoramento da concentração de sólidos por condutividade elétrica adaptado de ROCHA <i>et al.</i> , 2022.....	49
Figura 3.1: Representação Esquemática da Unidade I de Bancada de Monitoramento da Concentração de Sólidos com as respectivas alturas de cada ponto de medição da pressão. Fonte: AUTOR, 2023.....	51
Figura 3.2: Representação Esquemática da Unidade II de Bancada de Monitoramento da Concentração de Sólidos. Fonte: AUTOR, 2023.....	52
Figura 3.3: Representação esquemática da Unidade Piloto de Monitoramento da Concentração de Sólidos. Da base para o topo têm-se: transmissor 1 – CH1; transmissor 2- CH2; transmissor 3 – CH3; transmissor 4- CH4. Fonte: AUTOR, 2023.....	53
Figura 3.4: Painel de controle com inversores de frequência. Fonte: AUTOR, 2023.....	54
Figura 3.5: Unidade Piloto de Monitoramento da Concentração de Sólidos. Fonte: AUTOR, 2023.....	55
Figura 3.6: Transmissor de pressão utilizado em estudos de sedimentação. Fonte: SMAR.....	56

Figura 3.7: Representação esquemática do funcionamento do transmissor de pressão da SMAR e modelo LD301. Fonte: SMAR, 2022.....	57
Figura 3.8: Interface do Software de aquisição de dados. Fonte: AUTOR, 2022.....	58
Figura 3.9: Picnômetro em material de vidro utilizado na técnica de Picnometria.....	60
Figura 3.10: Analisador de Partículas Malvern Mastersizer 2000. Fonte: AUTOR, 2023.....	61
Figura 3.11: Reômetro da Anton Paar utilizado para estudos reológicos. Fonte: AUTOR, 2024.....	62
Figura 3.12: Fluxograma do planejamento experimental com os testes com Calcita e Barita nas unidades experimentais. Fonte: AUTOR, 2024.....	64
Figura 4.1: Distribuição do tamanho das partículas da Barita utilizada nos experimentos em bancada I para os testes preliminares. Fonte: AUTOR, 2022.....	59
Figura 4.2: Distribuição do tamanho das partículas da Barita utilizada nos experimentos realizados na Unidade de Bancada I, para concentração de 20% de Barita utilizado nos testes preliminares. Fonte: AUTOR, 2023.....	69
Figura 4.3: Curva de fluxo para a suspensão de água e barita com concentração de 20% (% v/v): a) Dados de tensão de cisalhamento por taxa de deformação; b) Dados de viscosidade por taxa de deformação. Taxa de deformação entre 0,0001 e 1000. Fonte: AUTOR, 2023.....	70
Figura 4.4: Distribuição do tamanho das partículas do Carbonato de Cálcio médio utilizado nos experimentos realizadas na unidade de bancada I, para concentração volumétrica de 7% nos testes preliminares. Fonte: AUTOR, 2024.....	71
Figura 4.5: Curva de fluxo para suspensão do fluido complexo com concentração volumétrica com 7% de Calcita, com presença de goma Xantana. Taxa de deformação entre 0,0001 e 1.000. Fonte: AUTOR, 2024.....	72
Figura 4.6: Distribuição dos tamanhos das partículas da Barita utilizada nos experimentos em Bancada II, a concentrações volumétrica de 10%, 15% e 20%. Fonte: AUTOR, 2024.....	73
Figura 4.7: Distribuição do tamanho das partículas da Calcita utilizada no experimento em Bancada II a concentrações volumétricas de 10% e 20%. Fonte: AUTOR, 2024.....	74
Figura 4.8: Dados de comparação de curva de fluxo para partículas da barita utilizada nos experimentos em bancada II, a concentrações de 10%, 15% e 20%: a) Dados de tensão de cisalhamento por taxa de deformação; b) Dados de viscosidade por taxa de deformação. Fonte: AUTOR, 2024.....	75

Figura 4.9: Dados de comparação de curva de fluxo para partículas da Calcita utilizada nos experimentos em bancada II, a concentrações de 10%, 15% e 20%: a) Dados de tensão de cisalhamento por taxa de deformação; b) Dados de viscosidade por taxa de deformação Fonte: AUTOR, 2024.....	76
Figura 4.10: Triplicata dos dados de concentração por tempo a concentração volumétrica de 10% de Barita. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 - transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2022.....	78
Figura 4.11: Ensaio de sedimentação com barita, evidenciando a presença da frente de sedimentação e da espuma contendo partículas sólidas aderidas. Fonte: AUTOR, 2023.....	79
Figura 4.12: Representação esquemática da segregação das partículas em suspensões com concentrações iniciais de sólidos intermediárias. Fonte: AMY et al., 2006.....	80
Figura 4.13: Curva de comparação da queda da interface superior ao longo do tempo, para a análise visual e monitoramento da pressão. Fonte: AUTOR, 2023.....	81
Figura 4.14: Curva de evolução da concentração por diferencial de pressão para teste de concentração volumétrica de 10% v/v de Barita. Fonte: AUTOR, 2023.....	82
Figura 4.15: Dados da concentração volumétrica por tempo a concentração de 20% de Barita. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2023.....	83
Figura 4.16: Evolução da concentração por diferencial de pressão a uma concentração volumétrica de 20% de Barita. Fonte: AUTOR, 2023.....	84
Figura 4.17: Dados de concentração volumétrica com 20% de Carbonato de Cálcio. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2023 Fonte: AUTOR, 2023.....	85
Figura 4.18: Evolução da concentração por diferencial de pressão para o Carbonato de Cálcio. Fonte: AUTOR, 2023.....	86
Figura 4.19: Dados de concentração com 10% de Barita, com a média e o erro padrão. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2024.....	87
Figura 4.20: Evolução da concentração por diferencial de pressão para a concentração volumétrica de 10% na Unidade de Bancada II Fonte: AUTOR, 2024.....	89

Figura 4.21: Evolução temporal dos dados da triplicata da sedimentação a concentração volumétrica de 10% para todos os pontos de medição. Fonte: AUTOR, 2024.....	89
Figura 4.22: Dados de concentração volumétrica com 15% de Barita. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2024.....	91
Figura 4.23: Evolução da concentração por diferencial de pressão para concentração volumétrica de 15% na Unidade de Bancada II. Fonte: AUTOR, 2024.....	92
Figura 4.24: Dados de concentração volumétrica com 20% de Barita. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2024.....	92
Figura 4.25: Curva de evolução da concentração por diferencial de pressão para a concentração volumétrica de 20% na Unidade de Bancada II. Fonte: AUTOR, 2024.....	93
Figura 4.26: Dados de comparações das concentrações volumétricas de 10%, 15% e 20% de barita. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2024.....	94
Figura 4.27: Dados de concentração com 10% de Calcita para os testes da Unidade de Bancada II. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2024.....	96
Figura 4.28: Teste de sedimentação com calcita. Presença de fluido turvo e sedimento na base da coluna da Unidade de Bancada II. Fonte: AUTOR, 2024.....	97
Figura 4.29: Curva de evolução por diferencial de pressão para a concentração volumétrica de 10% de Calcita na Unidade de Bancada II. Fonte: AUTOR, 2024.....	98
Figura 4.30: Dados de concentração volumétrica com 15% de Calcita para os testes da Unidade de Bancada II. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2024.....	99
Figura 4.31: Evolução da concentração da curva de sedimentação por diferencial de pressão para a concentração volumétrica de 15% de Calcita na Unidade de Bancada II. Fonte: AUTOR, 2024.....	99
Figura 4.32: Dados de concentração volumétrica de 20% de Calcita na Unidade II de Bancada. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2024.....	100

Figura 4.33: Curva de comparações do monitoramento da concentração volumétrica para 10%, 15% e 20% de Calcita na Unidade de Bancada II. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2024.....	101
Figura 4.34: Comparações do monitoramento da concentração volumétrica de sólidos para os fluidos com 10% de Calcita e Barita. Fonte: AUTOR, 2024.....	103
Figura 4.35: Curva de medidas de pressão da água para validação da investigação da técnica na Unidade Piloto. Fonte: AUTOR, 2024.....	105
Figura 4.36: Imagem da aproximação do canal 1 que está localizado a 345cm da base da coluna de sedimentação. Fonte: AUTOR, 2024.....	105
Figura 4.37: Dados da pressão atmosférica em relação ao nível do mar emitido para a cidade de Seropédica, utilizado para a comparação dos testes com água, de acordo com o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Fonte: INPE, 2024.....	105
Figura 4.38: Curva de concentração volumétrica de 10% de barita na Unidade Piloto. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2024.....	106
Figura 4.39: Dados da pressurização do sistema com o fluido confinado após 7 dias de sedimentação. Fonte: AUTOR, 2024.....	107
Figura 4.40: Dados da pressurização do sistema com o fluido confinado após 10 dias de sedimentação. Fonte: AUTOR, 2024.....	108
Figura 4.41: Teste de transmissibilidade de pressão: a) válvula de escoamento de fluido localizado na base da coluna; b) resíduo do teste de escoamento. Fonte: AUTOR, 2024.....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Materiais adensantes usado no fluido de perfuração. Fonte: Baltar,2003.....	8
Tabela 2 Equações simplificadoras. Fonte: D'ÁVILA, 1978.	26
Tabela 3 Dados da suspensão de Barita em água para os testes preliminares na Unidade I de Bancada, Fluido 1 e 2. Fonte: AUTOR, 2023.	64
Tabela 4 Dados da suspensão de Carbonato de Cálcio em água para os experimentos na Unidade I de Bancada, Fluido 3. Fonte: AUTOR, 2023.....	64
Tabela 5 Dados da suspensão de barita em água para os experimentos na Unidade II de Bancada, Fluido 1, 2 e 3. Fonte: Autor, 2023.....	65
Tabela 6 Dados da suspensão de calcita em água para os experimentos na Unidade II de Bancada, Fluido 1, 2 e 3. Fonte: AUTOR, 2023.	65
Tabela 7 Dados da suspensão de concentração volumétrica de barita para a Unidade Piloto – Fluido 1.	65
Tabela 8 Dados dos diâmetros das partículas da barita usado nos testes preliminares de sedimentação. Fonte: Autor, 2022.	68
Tabela 9 Dados dos diâmetros das partículas da calcita usado nos testes preliminares de sedimentação. Fonte: AUTOR, 2023.....	70
Tabela 10 Diâmetros da barita utilizada nos testes de sedimentação na Unidade de Bancada II. Fonte: AUTOR, 2024.....	73
Tabela 11 Dados de densidade do fluido para os testes na Unidade de Bancada II, de concentrações volumétricas de 10%, 15% e 20% de barita. Fonte: AUTOR, 2024.	73
Tabela 12 Diâmetros da barita utilizada nos testes de sedimentação na Unidade de Bancada II. Fonte: AUTOR, 2024.....	74
Tabela 13 Dados de densidade do fluido para os testes na Unidade de Bancada II, de concentrações volumétricas de 10%, 15% e 20% de calcita. Fonte: AUTOR, 2024.	74

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	01
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	07
2.1 Fluidos de Perfuração.....	07
2.2 Reologia dos Fluidos.....	08
2.2.1 Fluidos Newtonianos.....	09
2.2.2 Fluidos Não Newtonianos.....	09
2.2.3 Fluidos Pseudoplásticos.....	11
2.3 Princípios da Sedimentação.....	13
2.3.1 Sedimentação Em Suspensões Floculadas.....	23
2.3.2 Modelos Para Estudos Da Sedimentação.....	25
2.4 Técnicas De Monitoramento Da Concentração Dos Sólidos Em Processos De Sedimentação.....	38
2.4.1 Técnicas em Provetas.....	39
2.4.2 Atenuação por Raios Gama(γ).....	40
2.4.3 Monitoramento da Sedimentação por Pressão Hidrostática.....	42
2.4.4 Condutividade Elétrica.....	48
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
3.1 Unidades Experimentais.....	50
3.1.1 Unidade Experimental de Bancada I e II.....	50
3.1.2 Unidade Piloto.....	52
3.2 Técnica de Pressão Hidrostática.....	55
3.3 Monitoramento Visual da Interface de Sedimentação.....	59
3.4 Caracterização do Material Particulado e da Suspensão.....	59
3.4.1 Massa Específica da Partícula Sólida.....	59
3.4.2 Distribuição Granulométrica.....	60
3.4.3 Técnica de Gravimetria para Determinar a Concentração.....	61
3.5 Reologia dos Fluidos.....	62

3.6 Planejamento Experimental.....	63
3.6.1 Avaliação Preliminar da Transmissibilidade de Pressão.....	66
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
4.1. Caracterização do Sistema Particulado.....	67
4.1.1 Unidade de Bancada I: Testes Preliminares.....	67
4.1.1.1 Suspensão Barita 10%.....	67
4.1.1.2 Suspensão Barita 20%.....	68
4.1.1.3 Suspensão Calcita.....	70
4.1.2 Unidade de Bancada II.....	72
4.1.2.1 Suspensão de Barita Concentração 10%, 15% e 20%.....	72
4.1.2.2 Suspensão Concentração Volumétrica de Calcita 10%, 15% e 20%.....	73
4.1.2.3 Estudo Reológico para as Concentrações Volumétricas de Barita de 10%, 15% e 20%...74	
4.1.2.4 Estudo Reológico para as Concentrações Volumétricas de Calcita de 10%, 15% e 20%.....	75
4.2 Ensaio de Sedimentação.....	77
4.2.1 Unidade de Bancada I: Testes Preliminares.....	77
4.2.1.1 Concentração Volumétrica de 10% v/v de Barita.....	77
4.2.1.2 Concentração Volumétrica de 20% v/v de Barita.....	82
4.2.1.3 Concentração Volumétrica de 20% v/v de Carbonato de Cálcio.....	85
4.2.2 Unidade de Bancada II.....	87
4.2.2.1 Concentração de 10% v/v de Barita.....	87
4.2.2.2 Concentração de 15% v/v de Barita.....	90
4.2.2.3 Concentração de 20% v/v de Barita.....	92
4.2.2.4 Comparação entre as concentrações para cada canal.....	93
4.2.2.5 Concentração Volumétrica de 10% v/v de Calcita.....	96
4.2.2.6 Concentração Volumétrica de 15% v/v de Calcita.....	98
4.2.2.7 Concentração de 20% v/v de Calcita.....	100

4.2.2.8	Comparação entre as concentrações para cada canal dos testes com calcita.....	101
4.2.2.9	Comparação entre as concentrações volumétricas de 10% de barita e calcita.....	102
4.2.3	Unidade Piloto.....	104
4.2.3.1	Monitoramento da Concentração de Sólidos em Unidade Piloto.....	104
4.2.4.1	Transmissibilidade de Pressão.....	106
5.	CONCLUSÕES.....	110
6.	TRABALHOS FUTUROS.....	112
7.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	113
8.	ANEXOS.....	118

CAPÍTULO I

Resumo: o capítulo apresenta uma breve introdução à dissertação de mestrado. Destacam-se as motivações e objetivos que orientaram a pesquisa. Assim, a seção fornece uma visão ampla dos principais aspectos que impulsionaram os estudos.

1. INTRODUÇÃO

A indústria petrolífera é de grande importância para economia mundial e por muitos anos seu crescimento foi acelerado devido a demandas crescentes por energia. O Plano Estratégico da Petrobrás para 2023- 2027 apresenta um aumento na exploração e produção total de petróleo, conforme mostrado na Figura 1.1. É possível observar que a estimativa para os anos de 2024 a 2028 cresce de 3,9 milhões a 4,6 milhões de barris de petróleo e gás por dia, provenientes do pré-sal. Esse resultado advém da revitalização da Bacia de Campos com 200 poços a interligar e 4 novas unidades de produção (PETROBRÁS, 2023).

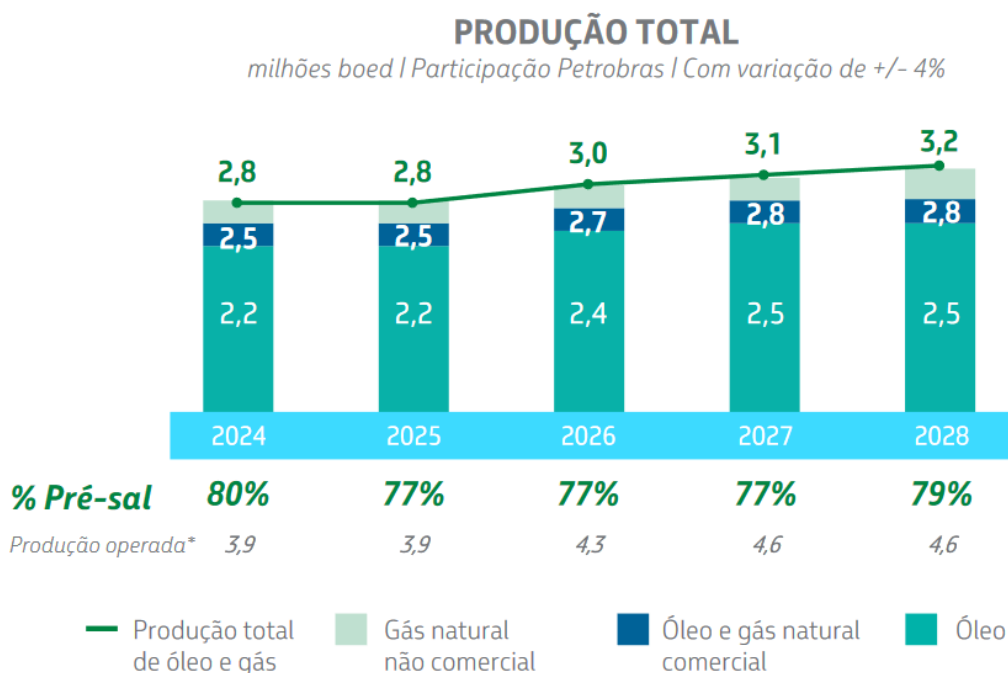


Figura 1.1. Plano estratégico para produção e exploração de petróleo desenvolvido pela Petrobrás para os anos de 2024 – 2028. Fonte: PETROBRÁS, 2023.

Para a extração de petróleo faz-se necessário o processo de perfuração de um poço. Ao realizar a perfuração, a sonda alcança o reservatório e eleva o petróleo até a superfície. De acordo com Thomas (2004), o sistema de perfuração é formado por um

conjunto de equipamentos que realizam o processo de perfuração. Um dos principais componentes do sistema é a coluna de perfuração (Figura 1.2), a qual tem como uma de suas funções a aplicação e peso sobre a broca, permitindo a condução do fluido de perfuração e o direcionamento do poço (PLÁCIDO, 2009).

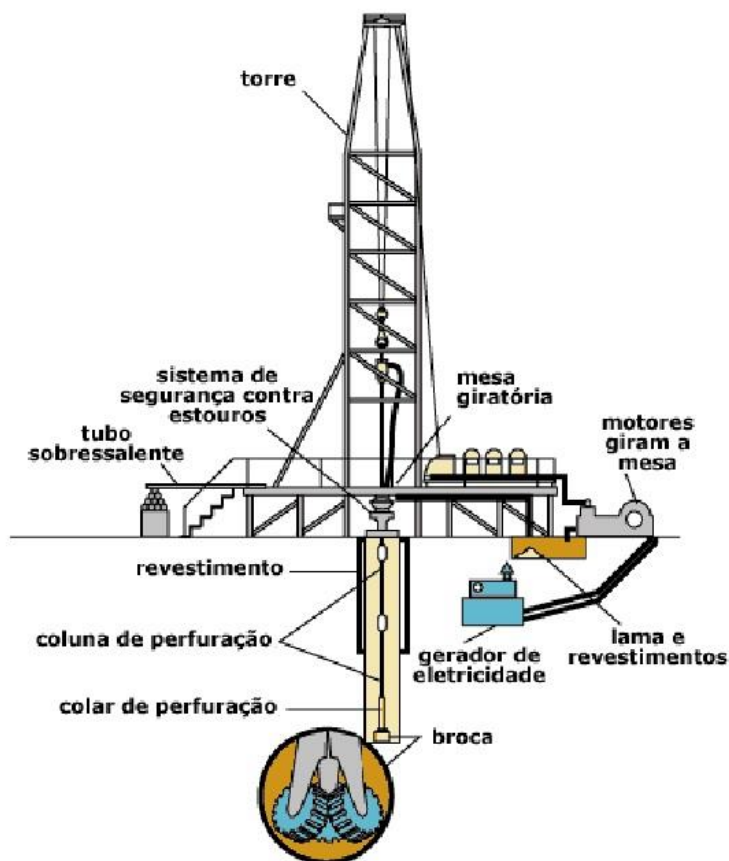


Figura 1.2 Sistemas da sonda de perfuração. Fonte: HOWSTULFWORKS, 2001.

Durante o processo de perfuração de poços de petróleo são utilizados fluidos de perfuração. Segundo a API (*American Petroleum Institute*, 1993), o fluido de perfuração, também conhecido como “lama de perfuração” é uma suspensão circulante que facilita e contribui para a operação de perfuração, e sua injeção ocorre através de sondas. Estes fluidos podem apresentar formulação a base água e base óleo. Estes são formados por misturas complexas que podem conter material orgânico, água, sólidos em suspensões e sais dissolvidos (Campos, 2007).

As propriedades físicas dos fluidos de perfuração, como densidade e viscosidade, devem ser precisas e controladas em uma faixa de operação. Assim, durante o processo de perfuração de poços de petróleo se faz necessário a adição de materiais minerais,

conhecidos como adensantes, que possui como objetivo melhorar as propriedades do fluido. Em particular, o aumento da densidade é um dos objetivos da adição dos agentes adensantes. Um dos aditivos sólidos que podem ser incrementados ao fluido é a barita (BaSO_4), que possui algumas vantagens como baixo custo de produção e manuseio (Mahmoud *et al*, 2017), baixo impacto ambiental, e é capaz de aumentar a densidade do fluido. No entanto, a barita, é um componente que dependendo de suas circunstâncias operacionais pode sofrer sedimentação. Assim, sua sedimentação ou de qualquer outro adensante pode ocasionar flutuações indesejáveis na densidade dos fluidos de perfuração, Eler (2012).

A construção de um poço de petróleo ocorre em etapas, entre elas podemos citar a perfuração da rocha, em diferentes diâmetros, e o assentamento dos revestimentos com a posterior cimentação para estabilização da estrutura do poço. Durante tal processo, parte do fluido de perfuração pode ficar confinado em uma região anular, formada entre dois revestimentos ou entre o revestimento e a formação rochosa. Todavia, o início da produção dos poços de petróleo pode ocorrer em torno de dois a três anos depois de sua completação (Calçada *et al.*, 2016). Assim, o confinamento do fluido de perfuração na região anular, durante o período estático, propicia a sedimentação das partículas sólidas que o constituem, que é identificado como *barite sag*, no caso de as partículas serem do mineral sulfato de bário.

O processo de sedimentação também pode ocorrer na coluna de perfuração uma vez que, pela força da gravidade, as partículas suspensas se deslocam para o fundo do poço (Figura 1.3). A sedimentação das partículas adensantes também propicia diversos problemas operacionais durante a perfuração do poço, tais como entupimento da tubulação, dificuldades de controle de pressão e perda de circulação (NGUYEN *et al.*, 2009)

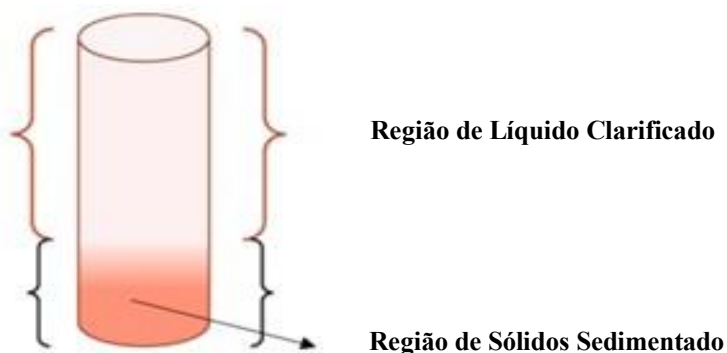


Figura 1.3 Variações de densidade resultante da sedimentação de sólidos. Fonte: MOHAMED, 2019.

Ao iniciar a fase de produção, o fluido que está confinado na região anular do poço é exposto a um aumento de temperatura a um volume constante. Portanto, como o fluido não poder expandir, o aumento de temperatura é acompanhado por um aumento da pressão na região anular que pode gerar riscos para o poço. Essa adição de pressão resulta em um processo chamado de *Annular Pressure Build-up (APB)*, caracterizado por um fenômeno térmico que pode resultar em danos aos revestimentos, bem como comprometer a integridade do poço (Vargo et al., 2003). É de suma importância considerar esse fenômeno na elaboração e planejamento do projeto do poço, pois podem ocorrer acidentes associados ao APB, como o observado no golfo do México, no poço Pompano A-31, no qual o APB provocou o colapso da tubulação (Figura 1.4). Desta forma, é importante desenvolver estratégias de mitigação da APB com o intuito de diminuir os problemas gerados, uma vez que podem prejudicar a integridade do poço e ocasionar desastres ambientais.



Figura 1.4 Tubulação colapsada no poço Pompano A-31. Fonte: PATTILLO; COCALES; MOREY, 2004.

Uma das estratégias de mitigação da APB é a comunicação entre o fluido no anular e a formação rochosa. A Figura 1.5, ilustra o esquema de um poço de perfuração em águas profundas, onde a zona C confinada está em contato direto com a formação rochosa e possui uma região denominada sapata aberta, enquanto as zonas A e B representam fluidos e revestimentos. A sapata aberta tem como função permitir o escoamento do fluido confinado para quando a pressão hidrostática do fluido se torna maior que a pressão da formação rochosa, desta forma o fluido será drenado para a formação e a pressão aliviada.

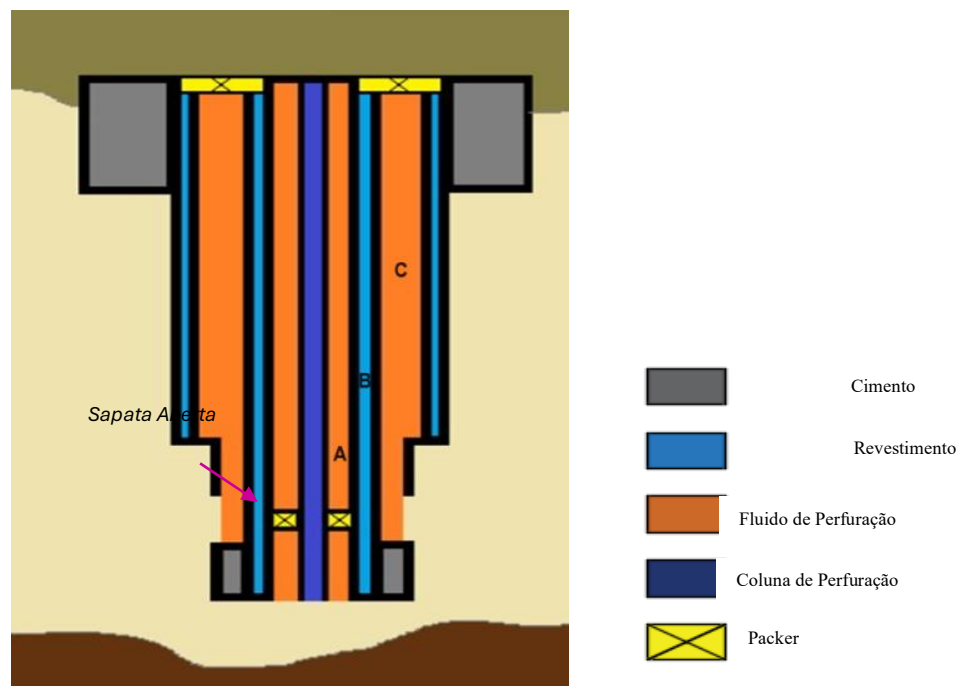


Figura 1.5 Representação esquemática de um poço de petróleo com sapata aberta, onde A e C são os fluidos de perfuração e B o revestimento. Fonte: AUTOR, 2023.

Contudo, a deposição resultante do processo de sedimentação do sólido adensante do fluido de perfuração no fundo do anular pode formar uma estrutura rígida, impermeável e compactada, que, segundo alguns autores, pode impedir o escoamento do fluido para a formação rochosa (ZAMORA, 2004). Assim, a sedimentação de sólidos adensantes, em especial a barita, se tornou um grande desafio para a indústria petrolífera (ZAMORA E BELL, 2004; OMLAND, 2007). Desta forma, uma série de problemas operacionais podem ocorrer, proporcionando a falha da estratégia de mitigação do APB. A falta de controle deste fenômeno pode resultar em sérios danos ao revestimento e comprometimento à integridade do poço (VARGO *et. al*, 2003).

A compreensão da sedimentação do material adensante é crucial, pois a formação do sedimento na região anular do poço pode resultar em uma altura que ultrapassa a da sapata aberta. Portanto, o monitoramento da concentração de sólido e a previsão da altura de sedimento dentro do anular são estudos fundamentais para prever se haverá alívio do APB ou não. Diante disso, uma investigação minuciosa do comportamento transiente da sedimentação deve ser realizada. Neste cenário, uma abordagem utilizando a técnica de pressão hidrostática tem se revelado no campo de estudo, propiciando uma análise da sedimentação por meio do acompanhamento da pressão ao longo da coluna de sedimentação utilizando transdutores de pressão.

No contexto atual, o presente trabalho objetiva monitorar, avaliar e entender o processo de sedimentação gravitacional de sólidos adensantes em fluidos de perfuração, por meio dos testes experimentais e avaliação da transmissibilidade de pressão. Para alcançar este objetivo, testes experimentais de sedimentação com fluido base água foram realizados em laboratório em três unidades construídas em diferentes escalas: duas unidades de bancada e uma unidade piloto de monitoramento da concentração de sólidos. Os aparatos experimentais foram desenvolvidos no Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani (LEF) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) e o monitoramento da sedimentação foi realizado por meio de transmissores de pressão. A Unidade de bancada foi utilizada para validar técnica de monitoramento por transmissores de pressão, em diferentes tamanhos de coluna. Já a Unidade Piloto foi construída com o objetivo de operar em escala maior, e testar a transmissão de pressão pelo sedimento formado no fundo do anular.

CAPÍTULO II

Resumo: O capítulo apresenta a revisão bibliográfica dos estudos de sedimentação de sólidos ao longo dos tempos, desde os pioneiros até os dias de hoje. Os modelos matemáticos de sedimentação são destacados, além das técnicas de monitoramento da concentração de sólidos usuais para o estudo da temática.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fluidos de Perfuração

A perfuração de poços é um dos principais meios de extração de petróleo do reservatório e para tal processo é importante utilizar a injeção de fluidos de perfuração. O fluido é um componente determinante para as operações de perfuração e suas funções estão relacionadas com a eficiência da perfuração. Estes são misturas complexas com material líquido, sólido e gasoso e que podem apresentar a forma de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão. De acordo com os estudos reológicos, o seu comportamento geralmente é não newtoniano (THOMAS *et al.*, 2004).

O fluido de perfuração exerce funções de grande importância, tais como: (a) transportar os cascalhos até a superfície e mantê-los suspensos durante as paradas operacionais; (b) exercer pressão estática nas paredes do anular, evitando o seu colapso e prevenindo o influxo de fluidos provenientes da formação rochosa; (c) manter o poço aberto até que o tubo de revestimento seja devidamente cimentado; e (d) resfriar e lubrificar a broca e a coluna de perfuração (BOURGOYNE JR, MILLHEIM, *et al.*, 1991).

Existem vários tipos fluidos de perfuração, mas os fluidos a base água ou a base óleo são tipicamente usados para a exploração de hidrocarbonetos, com diversos aditivos a fim de atingir suas principais funções (KATENDE *at.al*, 2019). Os fluidos à base de óleo, como um meio contínuo, são emulsões de água em óleo contendo diversos aditivos com funções específicas, e são tipicamente utilizados em poços de alta temperatura e pressão (THOMAS, 2001). Já os fluidos à base de água possuem a fase aquosa como contínua, e também apresentam a adição de diversos componentes químicos, como polímeros entre outros. Portanto, os fluidos depois de preparados com seus componentes e suas respectivas bases tornam-se misturas complexas aditivadas com sais dissolvidos e partículas sólidas em suspensão (CAMPOS, 2007).

O desempenho do fluido depende diretamente de propriedades físicas, químicas e reológicas (DARLEY *et al.*, 1988). Entre as propriedades importantes dos fluidos de perfuração destacam-se: densidade, o comportamento reológico, o teor de sólidos, índice de lubrificidade, resistência e estabilidade elétrica, comportamento viscoelástico e padrões de filtração. Por sua vez a densidade, que pode ser dada por lb/gal, ou qualquer outra unidade, melhora as características do fluido de perfuração contribuindo para evitar o influxo de fluidos da formação rochosa durante a perfuração ao estabelecer uma torta de filtração de baixa permeabilidade nas paredes do poço. O acompanhamento de tais propriedades é importante para antever e monitorar o comportamento do fluido e assim realizar as possíveis intervenções quando for necessário. A Tabela 1 mostra os materiais adensantes que podem ser adicionados à suspensão e suas respectivas funções.

Tabela 1 Materiais adensantes usado no fluido de perfuração. Fonte: Baltar,2003.

Materiais Adensantes	
Aditivos	Funções
Barita	Agente Controlador de Densidade
Bentonita	Agente Controlador de Viscosidade
Cálcario	Agente Controlador de Densidade

2.2 Reologia dos Fluidos

A reologia é responsável por estudo do comportamento da deformação e escoamento da matéria quando submetido a tensões em um longo período. Esta área do conhecimento aborda propriedades como elasticidade, viscosidade e plasticidade. Conforme Meschyan (1995), a reologia estuda as mudanças de estados de tensão e taxa de deformação ao longo do tempo.

O fluido pode ser definido como uma substância que se deforma de maneira contínua sob a ação de uma tensão de cisalhamento. Os fluidos podem ser classificados de acordo com a relação entre a taxa de cisalhamento e a tensão. Dependendo do comportamento da viscosidade, os fluidos podem ser classificados como newtonianos e não-newtonianos (FOX *et al.* 2014).

2.2.1 Fluidos Newtonianos

Os fluidos newtonianos mais comuns são água, ar e solventes orgânicos em condições normais. Fox *et al.* (2014) explicam que os fluidos obedecem a lei da viscosidade de Newton (Equação 2.1), e sofrem deformação contínua quando se submete a uma tensão de cisalhamento. O comportamento newtoniano indica que o aumento da taxa de deformação do fluido sujeito a tensões de cisalhamento crescentes ocorre de maneira linear. Além do mais, exibe uma constante de proporcionalidade que é a viscosidade dinâmica, μ . Propriedades como a viscosidade tem o intuito de medir a resistência interna ou fricção interna de uma substância quando submetida a uma tensão cisalhante. O fluido viscoso tem alta resistência a deformação, já em baixa viscosidade se deforma facilmente.

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.1)$$

Onde τ_{yx} é a tensão de cisalhamento, du a variação da velocidade na direção dy .

O comportamento linear típico do fluido newtoniano é apresentado na Figura 2.1, a qual a viscosidade se mantém constante, que é a característica esperada de um fluido newtoniano:

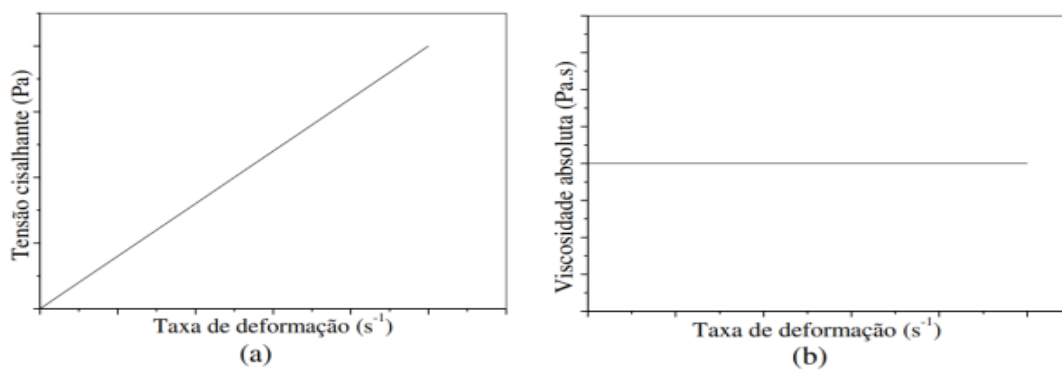


Figura 2.1 a) curva de escoamento, tensão versus deformação; b) curva de viscosidade. Fonte: FAGUNDES, 2019.

2.2.2 Fluidos Não Newtonianos

No caso dos fluidos não newtonianos, a tensão de cisalhamento não é proporcional a taxa de deformação, mostrando-se contrário aos newtonianos. A classificação destes fluidos ocorre através do seu comportamento dependente ou independente do tempo (FOX *et al.* 2014). A Figura 2.2 ilustra o comportamento reológico de fluidos não-newtonianos independentes do tempo de aplicação da tensão de cisalhamento.

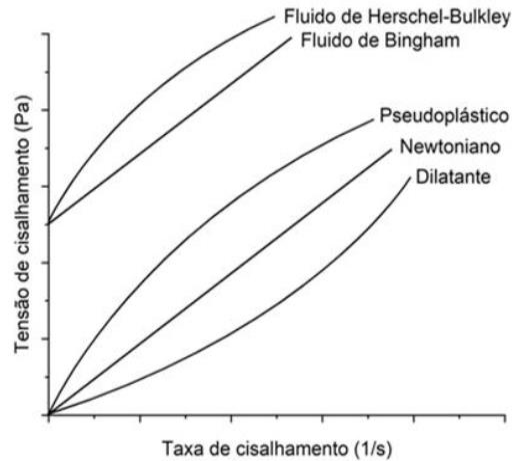


Figura 2.2 Curva reológica de fluidos não newtonianos e newtoniano. Fonte: CHHABRA E RICHARDSON, 2008.

Alguns modelos matemáticos descrevem o comportamento da tensão em relação a taxa de deformação. O modelo de *Power Law* ou lei de potência, é aplicado a deformações intermediárias da curva reológica e é regido pela Equação 2.2. Tal modelo é válido para uma faixa restrita de taxa de cisalhamento, sendo que os valores m e n variam de acordo com a faixa (CHHABRA e RICHARDSON, 2008). Os fluidos que são descritos pelo modelo citado são denominados de pseudoplástico ou dilatantes, por não precisarem de tensão limite para iniciarem o escoamento.

$$\tau = m\dot{\gamma}^n \quad (2.2)$$

Os parâmetros empíricos de ajuste da curva, m e n , são conhecidos como índice de consistência do fluido e de comportamento, e $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação. Para:

- $n < 1$, tem-se um fluido de comportamento pseudoplástico;
- $n > 1$, tem-se um fluido de comportamento dilatante;
- $n = 1$, tem-se um fluido newtoniano.

O modelo de Bingham (Equação 2.3) é usual para fluidos plásticos de Bingham, não existindo influência do tempo. As suspensões densas e pastas são bem descritas pelo modelo mencionado, onde exige uma certa tensão crítica inicial até atingir o escoamento,

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad (2.3)$$

onde τ_0 é a tensão crítica de escoamento, τ a tensão de cisalhamento, $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação

Outro modelo bem usual para estudos reológicos é o de Herschel-Bulkley, para fluidos de comportamento viscoplástico, e é denominado de Bingham generalizado, demonstrado na Equação 2.4 (REED, 1995).

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad (2.4)$$

2.2.3 Fluidos Pseudoplásticos

Para um fluido independente do tempo o comportamento não-newtoniano pseudoplástico é aquele em que a viscosidade aparente diminui à medida que a taxa de cisalhamento aumenta. Porém, soluções poliméricas caracterizadas como pseudoplásticas apresentam comportamento newtoniano em baixas ou altas taxas de deformação, conforme ilustrado na Figura 2.3. Para as taxas de deformação baixas e altas, essas apresentam uma viscosidade aparente de cisalhamento zero μ_0 , e uma viscosidade de cisalhamento infinito μ_∞ , ou seja, comportamento newtoniano.

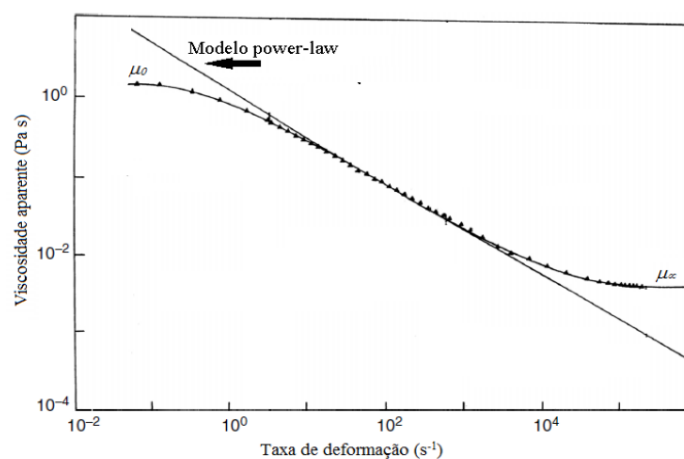


Figura 2.3 Curva reológica de uma solução polimérica. Fonte: CHHABRA E RICHARDSON, 2008

Outro modelo reológico comumente empregado para ajustar parâmetros experimentais em soluções poliméricas é o modelo de Cross, que se associa a Lei de potência. O modelo estabelece uma relação com a viscosidade, η , com os seus valores para muito baixas taxas de corte, η_0 , e para altas taxas de corte, η_∞ (MORENO,2018). O parâmetro K é expresso em unidades de tempo, enquanto o fator adimensional m descreve o grau de pseudoplasticidade do fluido. Valores de m tendendo para a unidade indicam um comportamento pseudoplástico do material, enquanto valores de m muito próximos de zero sugerem que estamos lidando com um fluido newtoniano. A equação 2.5 descreve o modelo citado.

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{1 + (K\dot{\gamma})^m} \quad (2.5)$$

Castor Jr. *et al.* (2023) analisaram o comportamento reológico de polipropileno isostático linear de vários graus sob diferentes condições de temperatura e taxa de cisalhamento. Em seus estudos foi observado um padrão de diluição por cisalhamento e platôs newtonianos primários em faixas específicas de taxa de cisalhamento, variando conforme a massa molar. Sendo assim, constataram que modelos como Cross e Carreau-Yasuda são eficazes para alguns graus de polipropileno.

2.2.4 Ensaio Reológicos

Através da reologia torna-se possível estudar o comportamento do fluido em relação a deformação por meio da caracterização do material. Assim, ensaios reológicos são utilizados para tal finalidade. Para avaliar algumas propriedades como as viscoelásticas, utiliza-se a reometria, que é um conjunto de técnicas experimentais realizados por instrumentos, os viscosímetros e reômetros. Os viscosímetros mensuram a viscosidade e o fluxo dos fluidos, enquanto os reômetros são empregados para avaliar as propriedades reológicas, a fim de compreender o comportamento mecânico de fluidos complexos, incluindo viscosidade, tensões cisalhantes e normais, deformações, módulos elásticos e viscosos, entre outros (MACOSCO, 1994).

As medições reológicas podem ser realizadas em regime permanente de cisalhamento, regime oscilatório ou dinâmico. Para o regime permanente o rotor gira a uma velocidade constante e um único sentido, havendo um fluxo laminar. Em

contrapartida, os testes oscilatórios envolvem a aplicação de rotação nos dois sentidos (Nascimento, 2007).

Os testes rotacionais podem ser curva de tensão em função da taxa de cisalhamento, e tixotropia. O primeiro é em função a taxa de cisalhamento permitindo determinar o fluido a ser investigado. Já para a tixotropia tem-se um fluido em que a viscosidade aparente diminui sobe a aplicação de tensões, porém, torna-se capaz de recuperar a sua microestrutura original ao longo do tempo. Outros testes como rampa de tensão, rampa de cisalhamento, teste de creep-recovery e reopexia se encaixam na categoria rotacional reológica.

Para testes oscilatórios, a varredura de amplitude permite investigar o comportamento viscoelástico linear do material (GALINDO, 2006). Além disso, para verificar a influência da temperatura na microestrutura da amostra indica-se a rampa de temperatura. outro ensaio usual para testes oscilatórios tem-se a varredura de frequência que ocorre em diferentes frequências de oscilação a uma dada temperatura.

2.3 Princípios da Sedimentação

O estudo da sedimentação é um processo abordado na literatura científica. A técnica vem sendo extensivamente investigada ao longo dos anos, assim, no atual contexto, a presente pesquisa apresenta uma revisão dos trabalhos mais relevantes. O enfoque do trabalho é direcionado na análise dos estudos mais importantes da sedimentação, visando oferecer um entendimento mais aprofundado da temática (Moolman, 2008).

O processo de sedimentação é uma operação unitária que consiste na separação gravitacional de entre sólido e líquido fundamentado na diferença da densidade entre as fases existentes na suspensão. Esta separação (decantação, sedimentação ou espessamento) ocorre através de tanques cilíndricos ou retangulares denominados sedimentadores (CREMASCO, 2012). O fenômeno de sedimentação nada mais é que a diferenciação entre a densidade dos materiais de uma suspensão devido à ação de forças como a gravitacional e o empuxo. Por França e Casqueira (2007), através da ação

gravitacional as partículas sólidas são retiradas da corrente líquida oferecendo um processo de baixo custo e de fácil operação.

Os estudos de sedimentação de partículas sólidas iniciaram com Stokes (1850), que avaliou a queda de uma partícula isolada em um fluido newtoniano. Assim, para uma partícula esférica, Stokes (1850) descreve que a velocidade de sedimentação é diretamente proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula, Equação (2.6),

$$v_{\infty} = \frac{d_p^2(\rho_s - \rho_l)}{18\mu} \quad (2.6)$$

onde, ρ_s e ρ_l são respectivamente a densidade do sólido e do líquido, μ a viscosidade e d_p o diâmetro da partícula.

Em pequenas concentrações prevê-se a velocidade de queda das partículas sólidas pela equação de Einstein (Equação 2.7) (STOKES, 1850). Sendo que para partículas esféricas o $\alpha = 2,5$, e ε_s é a concentração de sólidos.

$$v_{stk} = (1 - \alpha\varepsilon_s) \quad (2.7)$$

Como pioneiros do estudo de sedimentação, Coe e Clewenger (1916) enfatizaram a disposição de partículas em sistemas em batelada para determinar a capacidade de sedimentadores contínuos, com análise em provetas para diferentes concentrações iniciais (Figura 2.4). Ao analisarem os experimentos observaram que no início do ensaio a suspensão se apresentava homogênea, e a concentração da fase particulada se manteve constante, e a medida que ocorreu a evolução temporal, os sedimentos apareceram na base do recipiente teste, no caso a proveta. Assim, foram identificadas 4 zonas de sedimentação: zona A, líquido clarificado sem partículas sólidas, zona B suspensão com concentração constante igual a inicial; zona C de concentrações variáveis, maior que a inicial e D a zona compactada, onde não há mais sedimentação livre de partículas, apenas a compactação do sedimento.

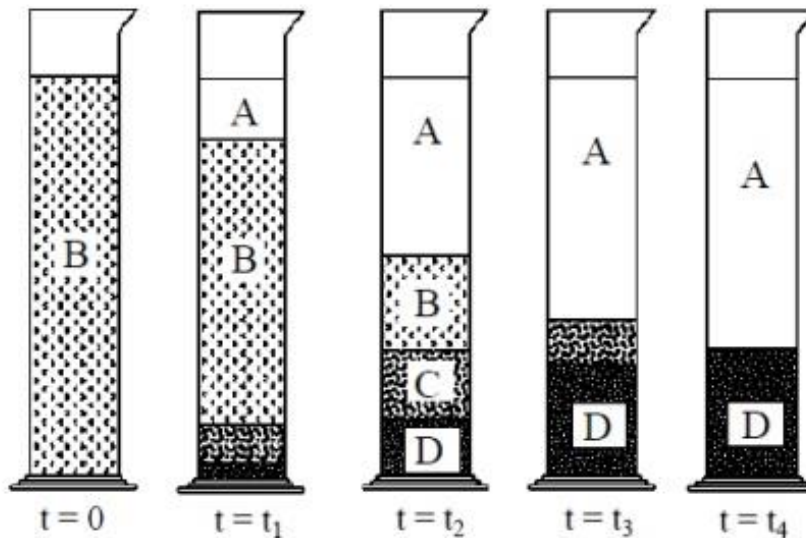


Figura 2.4 Testes em proveta para análise das interfaces no processo de sedimentação, ensaios em batelada. Fonte: COE e CLEVENGER, 1916.

Com base nos testes de sedimentação em batelada, Coe e Clevenger apresentaram uma expressão para o cálculo da área do sedimentador contínuo, o qual relacionaram a concentração inicial com a velocidade inicial obtendo-se a velocidade superficial dos sólidos (Equação 2.8), onde ε_{s0} e ε_{sU} são concentração inicial do sólido e da lama.

$$q_s^* = \frac{v_{s0}}{\frac{1}{\varepsilon_{s0}} - \frac{1}{\varepsilon_{sU}}} \quad (2.8)$$

Já Comings (1940), através do uso de um protótipo de sedimentador contínuo, analisou a teoria apresentada por Coe e Clevenger (1916) e constatou que é válida para sedimentos incompressíveis, questionando a teoria proposta. No entanto em seus estudos, ao conduzir experimentos com carbonato de cálcio, observou-se um acúmulo de sedimento do material no fundo do cilindro formando uma zona de compressão rígida e apta a resistir a pressões consideráveis sem sofrer deformações. Assim, notou-se que essa estrutura compactada terá efeito insuficiente na concentração máxima de sólidos, em especial em sedimentos compressíveis, onde a altura da região compactada é um fator determinante para se obter a capacidade de um sedimentador contínuo.

Kynch (1952) propôs uma teoria da sedimentação, por meio de um estudo cinemático baseado na propagação de ondas de mesma concentração sendo aplicado para projetos de sedimentadores. A teoria faz relação com a velocidade de queda da partícula

e a concentração volumétrica da partícula local. Desta forma, o estudo foi fundamentado na observação da queda da interface superior nos ensaios de sedimentação em proveta, diante de algumas hipóteses. O autor desenvolveu uma teoria matemática da sedimentação utilizando a equação da continuidade da fase particulada.

Através das hipóteses abaixo, Kynch (1952) propôs o modelo matemático:

- A concentração de sólidos é unidimensional;
- Ao transcorrer do tempo a concentração de sólidos aumenta na base do recipiente teste;
- A velocidade de sedimentação tende a zero quando a concentração de sólidos se aproxima do valor máximo;
- Os efeitos de paredes são desprezados;
- As partículas contêm o mesmo tamanho e forma.
- A velocidade de sedimentação é influenciada pela concentração local de sólidos;

A partir das hipóteses descritas, Kynch (1952) propôs equações com intuito de descrever o processo de sedimentação em batelada a partir da equação da continuidade da fase sólida (Equação 2.9) e desconsiderou o balanço de forças presente no sistema sólido-líquido.

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} + \frac{\partial f_{bk}}{\partial z} = 0 \quad (2.9)$$

Para $0 \leq z \leq L$, $t > 0$, ε_s representa a concentração volumétrica de sólidos em função da altura (z) e do tempo (t), e L a altura da coluna medida a partir da sua base. O $f_{bk} = \varepsilon_s v_s$ é a função da densidade de fluxo em batelada, ou seja, o volume de sólido atravessa a seção horizontal da coluna por tempo, e v_s é a velocidade da fase sólida. Kynch supôs que a velocidade de sedimentação do sólido depende da concentração local. Assim, a concentração de sólidos no plano horizontal é constante, e o fluxo de partículas dependerá exclusivamente da concentração ($f_{bk} = f_{bk}(\varepsilon_s)$). Assim têm-se a relação abaixo:

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} + v(\varepsilon_s) \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} = 0, \quad (2.10)$$

$$v^*(\varepsilon_s) = \frac{df_{bk}}{d\varepsilon_s}. \quad (2.11)$$

Segundo Rocha (2018), apesar de Kynch (1952) não ter explicitado em seu trabalho original, as condições iniciais e de contorno para resolução da Equação (2.12), fica entendido que:

$$\varepsilon_s(t = 0, x) = \varepsilon_{s0}, \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_s(t > 0, x = 0) = \varepsilon_{sm}, \quad (2.13)$$

sendo que ε_s equivale a concentração volumétrica do sólido, $v^*(\varepsilon_s)$ é a velocidade de ascensão da equi-concentração, $q_s = \varepsilon_s v_s$, que se apresenta como fluxo de sólidos, v_s velocidade de queda das partículas, ε_{s0} concentração inicial de sólidos e ε_{sm} concentração máxima.

As equações desenvolvidas por Kynch descrevem matematicamente a interface ascendente, ou seja, inferior, já a descendente faz necessário obter comprovações empíricas. Desta forma, a teoria proposta atende apenas a propagação de ondas de equi-concentração conduzidas do fundo do recipiente ao topo do sedimento.

Em seus estudos, Kynch usou como base a lei da conservação da massa e o processo de sedimentação foi obtido a partir da equação da continuidade para a partícula sólida. Foi desconsiderado o balanço de forças que atuam no sistema fornecidos pela equação do movimento, afirmando serem equações de caráter hiperbólico.

Foi obtida a curva típica de sedimentação em batelada, vista na Figura 2.5, na qual a interface descendente tem função com o tempo, e é apresentado pela Equação (2.14)

$$\frac{dx}{dt} = -v_s(\varepsilon_s), \quad (2.14)$$

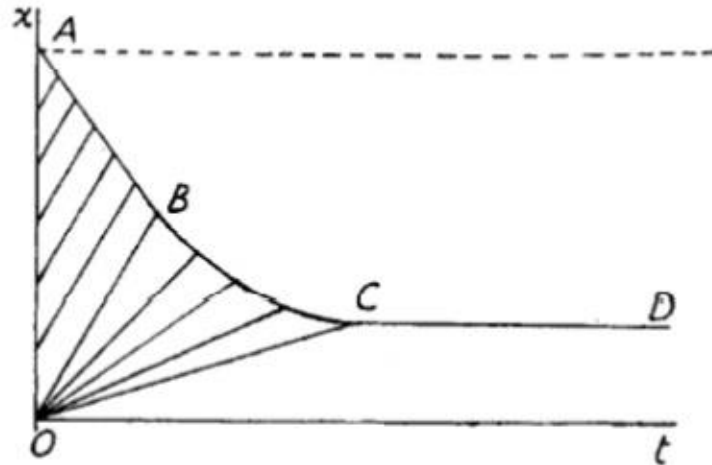


Figura 2.5 Curva de sedimentação em batelada, com linhas de propagação da equi concentração. Fonte: KYNCH, 1952.

A Figura 2.5, remete a curva de propagação do processo de sedimentação em batelada x e t , observado por linhas de propagação de densidade dos sólidos apresentando quatro regiões de sedimentação, a qual é demarcado com letras (A, B, C, D). As regiões de sedimentação são:

Região ABCD – líquido clarificado: acima dos pontos ABCD têm-se concentração de sólidos nula ($\varepsilon_s = 0$) e ausência de velocidade de sedimentação.

Região AOB – sedimentação livre: concentração de sólidos é a mesma da inicial.

Região BOC - transição: área de concentrações variáveis. Nesta se observa uma diminuição da velocidade de sedimentação ao passo que a concentração de sólidos aumenta.

Região OCD - sedimento: área onde ocorre a sedimentação com concentração máxima e velocidade nula.

A validade da teoria de Kynch é apenas para sedimentos incompressíveis e não representa o processo de formação de sedimentos compressíveis, trazendo dificuldades do uso da “teoria” em processos industriais (Arouca, 2007). A partir do modelo proposto por Kynch pode-se desenvolver projetos de sedimentadores contínuos por meio de dados experimentais obtidos em processos de sedimentação em batelada.

Os autores Richardson e Zaki (1954) conduziram um estudo experimental onde analisaram o impacto da concentração de sólidos na taxa de deposição das partículas em processos de sedimentação. Os autores desenvolveram um modelo que determina a relação entre a velocidade superficial do fluido e a velocidade terminal de uma partícula isolada na sedimentação. Considerou-se concentração de sólidos correspondente à velocidade máxima de fluidização, onde a concentração é dada como:

$$\varepsilon = \varepsilon_{mf} \approx 0.4, \quad (2.15)$$

$$\frac{v_s}{v_\infty} = \varepsilon^n. \quad (2.16)$$

Na Equação 2.15, considera-se que v_s é a velocidade de sedimentação, v_∞ é a velocidade terminal da partícula isolada, ε é a concentração volumétrica de sólidos e n é um parâmetro que tem dependência com o número de Reynolds da partícula.

Por meio de estudos teóricos e experimentais, Shirato *et al.* (1970) estudaram a interação entre a sedimentação e a consolidação de sedimentos compressíveis. Seus estudos estabeleceram como objetivo obter um método para prever a dinâmica da sedimentação das partículas de óxido de zinco e óxido de ferro em água. Sendo assim, a força motriz do fluxo ascendente do líquido por meio do sedimento é originária da pressão em excesso nos poros em relação à pressão hidrostática. A discrepância ocorre devido a influência da força gravitacional que atuam nas partículas.

Lali *et al.* (1989) estudaram o efeito de parede sobre a velocidade terminal de partículas esféricas em fluidos não newtonianos e estabeleceram uma correlação entre a velocidade terminal e a razão entre o diâmetro dos sólidos e o diâmetro do recipiente teste, $\frac{d_p}{D}$. Os autores explicitaram que o efeito de parede foi observado e negligenciado, uma vez que o diâmetro das partículas ser menor que o diâmetro do recipiente teste. Assim, os estudos de sedimentação têm-se os efeitos de paredes negligenciados (KYNCH, 1952; d'ÁVILA, 1978).

Os estudos desenvolvidos por Bobroff e Phillips (1998), por meio de imagens obtidas por ressonância magnética nuclear, analisaram as taxas de sedimentação de suspensões concentradas e não coloidais em fluidos viscoelásticos. Os ensaios experimentais foram conduzidos em condições abaixo e acima da taxa de cisalhamento crítica, sendo o ponto que o fluido demonstra um comportamento reológico

pseudoplástico. Os autores foram capazes de observar os efeitos da viscosidade e da elasticidade quando observaram a queda da interface superior. Portanto, como as características reológicas dependem do tempo, as taxas de sedimentação dependem da transição entre o comportamento elástico e viscoso, ao contrário dos fluidos newtonianos que apresentam comportamento puramente viscoso. Imagens da suspensão revelam o desenvolvimento de uma microestrutura não homogênea durante a sedimentação em um fluido viscoelástico. Assim, foi observado a agregação das partículas em colunas alinhadas na direção do escoamento, separadas pela fase líquida e formando corredores, apresentado na Figura 2.6. Sendo assim Bobroff e Phillips (1998) sugerem que a discrepância qualitativa entre fluidos newtonianos e não newtonianos são atribuídas a mudanças na microestrutura da partícula.

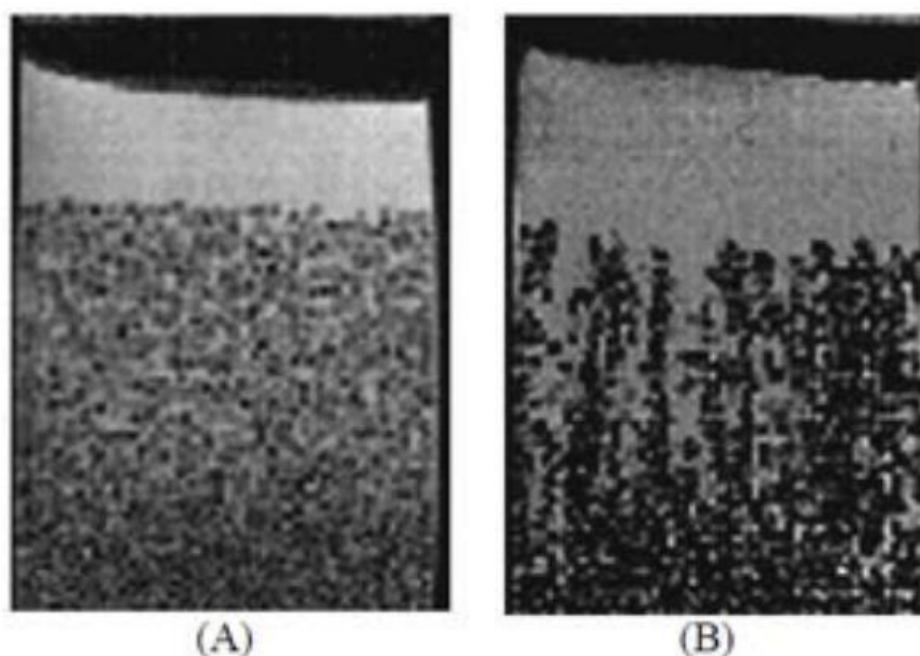


Figura 2.6 Imagens da sedimentação de partículas obtidas por ressonância magnética de um fluido newtoniano (A) e fluido viscoelástico (B). Fonte: BOBROFF e PHILLIPS, (1988).

Daugan *et al.* (2002) investigaram a sedimentação em fluidos pseudoplásticos em suspensões de partículas monodispersas. Em um primeiro momento, analisaram o comportamento de esferas em uma solução aquosa com goma xantana e posteriormente estudaram a dinâmica com três esferas. Inicialmente a suspensão se manteve homogênea com o teor de sólidos equivalentes a concentração inicial das partículas. Simultaneamente ocorreu o processo de aglomeração do material particulado formando corredores de viscosidade reduzida, conceito o atribuído a Joseph e Liu (1993). Ao cair a primeira esfera, ocorre um cisalhamento no fluido e a viscosidade diminui. Em uma mesma

trajetória vertical se o tempo de queda entre uma esfera e outra for maior for superior ao tempo de relaxação do fluido, a segunda esfera não encontrará o corredor de viscosidade reduzida. Foram originadas colunas de sólidos alongadas pela aglomeração das partículas com presença de líquido ocupando espaço entre elas. Em uma fase final, tais colunas verticais de sólidos desapareceram por um processo lento de sedimentação das partículas restantes.

Ao estudarem a sedimentação de suspensões, Daugan *et al.* (2004) utilizaram partículas monodispersas em fluidos pseudoplásticos, pelo método de atenuação de luz, conforme apresentado na Figura 2.7. O intuito do estudo foi realizar a comparação do comportamento da sedimentação em fluidos não newtonianos com os fluidos de viscosidade constante. Os autores buscaram analisar como as propriedades dos fluidos impactam na deposição de partículas sólidas durante o processo de sedimentação. Daugan *et al.* (2004) observaram uma interface descendente e um aumento na concentração volumétrica inicial de sólidos que acelerou a deposição das partículas, contrariando o comportamento newtoniano, o qual o aumento da concentração retardaria a sedimentação. Sugere que este fenômeno está relacionado ao aumento do número de colunas verticais identificadas nas suspensões iniciais mais concentradas. no início.

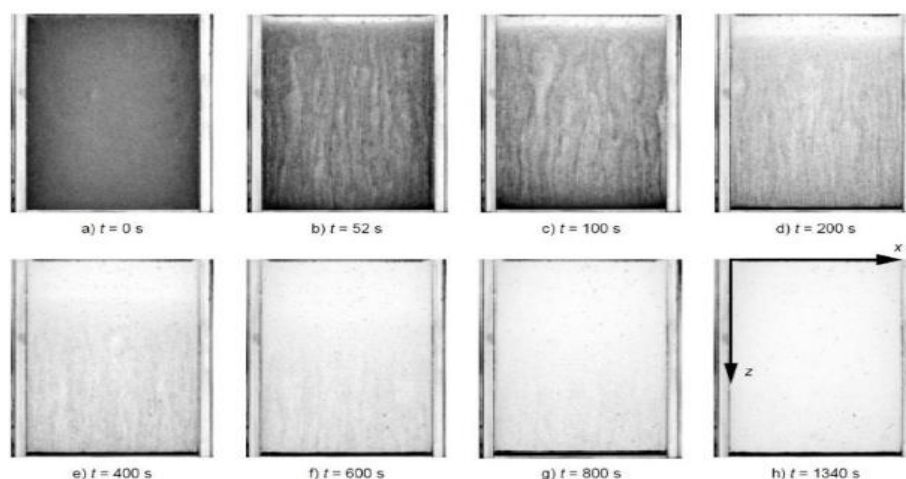


Figura 2.7 Suspensões em sedimentação em soluções de goma xantana a 1500 ppm. Fonte: DAUGAN *et al.* (2004).

Gueslin *et al.* (2006) investigaram a influência da tensão exercida na formação e na estrutura dos corredores de viscosidade reduzida. Por meio de esferas de densidades diferentes e tamanhos iguais os autores ressaltaram que nos ensaios experimentais o par de esferas apresentava a mesma densidade. Os autores concluíram que em condições específicas de proximidade vertical as esferas se agruparam independentemente do campo

de velocidade, sugerindo que a força de interação entre elas foi mais preponderante que o movimento do fluido.

Já na pesquisa desenvolvida por Mora *et al.* (2005), foi investigado a sedimentação de suspensões em baixas concentrações de partículas monodispersas em fluidos poliméricos de características pseudoplásticas. Observaram que durante a sedimentação foi formado uma estrutura, um combinado de sólido e líquido com alto teor de particulado. Tal estrutura foi observada em direção a base do recipiente, sendo que o volume de líquido ascensional é maior que o volume de sólido em sedimentação, o que é característico para um fluido não newtoniano. Os resultados obtidos sugeriram que a estrutura formada é uma consequência da agregação da partícula.

França e Casqueiro (2007) descreveram fatores como a natureza da partícula e o efeito da concentração de sólidos, como influenciadores que afetam o processo de sedimentação. No estudo da natureza da partícula, a esfericidade influencia de maneira negativa no processo de sedimentação. Partículas esféricas sedimentam com mais facilidade, por terem uma maior velocidade terminal, enquanto as menores tendem a permanecerem em suspensão. Então para atenuar a irregularidade da partícula técnicas como floculação e coagulação, contribuem para aumentar a esfericidade da partícula

Suspensões muito concentradas de acordo com França e Casqueiro (2007) também afetam a sedimentação. As características da sedimentação destas são diferentes da sedimentação de partículas isoladas, por conta do efeito da concentração. Segundo Cremasco (2012), efeito resulta o fenômeno da sedimentação impedida, no qual a taxa de sedimentação deixa de ser constante para se tornar decrescente.

Outro fator que influencia na sedimentação dos materiais são as propriedades reológicas dos fluidos (Tehrani *et al.*, 2004). Nguyen (2009) ressalta que ainda não se descobriu parâmetros reológicos ideais para fluidos de perfuração. Todavia algumas observações experimentais evidenciam que o processo de sedimentação das partículas adensantes ocorre com maior intensidade a baixas taxas de cisalhamento, ou seja, em baixas velocidades de escoamento e a baixa velocidade de rotação da broca, (HEMPHIL & RAVI, 2006).

2.3.1 Sedimentação em Suspensões Flocculadas

A sedimentação de suspensões flocculadas vem sendo objeto de estudo em várias pesquisas, destacando a compressibilidade do sedimento formado no processo de sedimentação. O fenômeno relaciona à formação de estruturas flocculadas a partir de partículas que se aglutinam em suspensões. Entender a relação da interação entre as partículas no meio fluido é crucial, pois influenciam na dinâmica da sedimentação.

Smellie e La Mer (1957) estudaram suspensões com materiais flocculentos e concluíram que a taxa de sobrenadante pode ser equacionado através da lei de Darcy que é embasada no movimento dos fluidos em meios porosos e permeáveis. Michaels e Bolger (1962) investigaram as taxas de sedimentação e os volumes de materiais flocculados em suspensões aquosas. Já França et al (1996) caracterizaram as suspensões flocculentas por meio dos métodos de Coelho e Massarani (1996) e Michaels e Bolger (1962) aplicando em situações que não estejam no regime de Stokes. Farrow et al (2000) desenvolveram um modelo computacional para indicar a atuação do sedimentador em várias condições de processo, objetivando a melhoria da flocculação e a operação dos equipamentos

Scott (1968) realizou ensaios de sedimentação com materiais em suspensões em um sedimentador contínuo. Nos testes foi empregado o método para a sedimentação em batelada, obtendo equações empíricas que relacionaram a concentração de sólidos local juntamente com a velocidade de sedimentação, para concentrações entre 0,005 e 0,006 g/cm³. Com o propósito de comparação, os métodos escolhidos foram os de Talmage e Fitch (1955) e Cloe e Clevenger (1916). Ao avaliarem a metodologia, além de divergência entre as teorias, foi observado a presença de formação de canais, conhecidos como *chanelling*, no qual aumentam o coeficiente hidráulico e aceleram a sedimentação.

Michaels e Bolger (1962) estabeleceram correlações de dados experimentais por meio de uma forma modificada do método proposto por Richardson e Zaki (1954). Os seus estudos assumiram que cada floco adotava uma esfericidade e a água presente dentro do floco se movia com ele próprio. Diante dessas suposições esperou-se uma movimentação dos flocos na região de sedimentação livre. Ainda nos estudos, os autores identificaram que na região de compressão, o floco perdia sua identidade e formava uma estrutura compressível. Para a região de compressão, Michaels e Bolger (1962),

utilizaram de maneira análoga, o modelo de consolidação do solo de Terzaghi para desenvolver um modelo com capacidade de prever a taxa de subsidência na zona de compressão. Então, consideraram que a polpa de compressão tem uma resistividade e um limite de compressão que tem dependência com a concentração de sólidos.

Ao analisarem o comportamento de suspensões com partículas floculadas, assim como Scott (1968), Chakravarti e Dell (1969) também analisaram o comportamento de suspensões com elevada formação de flocos. Os experimentos realizados pelos autores mostraram que a taxa de formação de sedimento decresce exponencialmente com o tempo desde o início de um ensaio em batelada. Essa observação experimental contrariou teorias estabelecidas até aquele momento, as quais prediziam que, inicialmente, tal taxa deveria permanecer constante. Um dos exemplos a serem citados é a teoria de Kynch (1952) que descreve a sedimentação como ondas de concentração que se propagam a velocidade constante a partir da base do recipiente de testes. Chakravarti e Dell (1969) associaram o decréscimo exponencial da taxa de formação de sedimento com os mecanismos de compressão e escoamento ascensional do líquido expelido da matriz porosa formada pelos flocos. Considerando uma região na qual estão presentes fissuras ou canais estreitos na zona de compressão, o líquido escoaria pelo caminho de menor resistência, sendo expelido, portanto, preferencialmente via canais em detrimento da difusão via interstícios. Segundo os autores, ambos os mecanismos, em última instância, dependem da massa de sólidos no sistema. Segundo Chakravarti e Dell (1969), seus experimentos sugerem que a taxa de formação de sedimentos tem queda exponencial com o tempo para uma dada concentração, em ensaios de sedimentação em batelada e com suspensões com alta formação de flocos.

Alguns autores, como Harris et al. (1975), também estudaram e analisaram curvas de sedimentação em batelada com a presença de fosfato, aditivo que objetiva acelerar o processo de sedimentação. Perante a análise, as curvas de sedimentação apresentaram comportamento assintótico, indicando ser material compressível, mostrando que partículas floculam formando aglomerados. Identificaram a presença de vários estágios, no qual cada faixa indica um mecanismo específico da sedimentação. O experimento de Harris *et al.* (1975) foi realizado com suspensão de partículas finas e água, que sedimentaram por gravidade, formando uma interface entre a suspensão e a água sobrenadante. Assim, foram sugeridos modelos fenomenológicos para equacionar cada região, com base na taxa ascendente de líquido e na resistência ao escoamento. Os autores

consideraram que durante a sedimentação, a taxa de água era expulsa da suspensão e sua passagem pela interface superior dependia da quantidade de água abaixo da interface. Baseado nesse mecanismo os autores propuseram modelos equacionais em termo de frações de água recuperáveis (abaixo da interface) e reformularam as equações em relação as alturas correspondentes aos limites das regiões de sedimentação. Embasado nessas informações, Harris *et al.* (1975) mostraram por meio das equações um decaimento exponencial da interface superior, assim como ocorreu com os experimentos de Chakravarti e Dell (1969).

Suspensões podem conter partículas de diferentes tamanhos, sendo consideradas polidispersas. Lockett e Al-Habbooby (1973, 1974) desenvolveram uma modelagem matemática para prever a sedimentação de partículas do sistema. Usaram a correlação monodispersa de Richardson e Zaki (1954) para prever a velocidade do sólido em cada fase, o qual a concentração total de partículas é usada para corrigir a velocidade terminal, por meio da equação de Stokes.

2.3.2 Modelos para Estudos da Sedimentação

Para compreender a dinâmica da sedimentação em suspensões, ferramentas numéricas são utilizadas com intuito de investigar a deposição das partículas sólidas. Os modelos desenvolvidos incluem equações e simulações computacionais que avaliam a deposição das partículas sólidas no ambiente de estudo. Esses modelos consideram alguns fatores importantes, como a velocidade da sedimentação, a densidade da partícula, seu diâmetro e concentrações volumétricas da fase sólida e líquida, viabilizando a compreensão do fenômeno da sedimentação.

D'Ávila (1978) propôs um modelo matemático com base na Teoria da Mecânica do Contínuo. A teoria de D'Ávila explicita que o sistema particulado é composto por dois meios contínuos. O estudo da sedimentação em batelada ocorreu através das equações da continuidade e do movimento, com ênfase nos sólidos. O autor adotou hipóteses constitutivas relativas à tensão nos sólidos e à força resistiva. D'Ávila realizou as seguintes considerações para realização do modelo:

- A sedimentação é um fenômeno unidimensional;
- As fases são incompressíveis;

- Os tensores tensões são funções da porosidade do meio para fase líquida e sólida, assim:

$$T_s = T_s(\varepsilon_s) = -P_s(\varepsilon_s) \quad (2.17)$$

- São desprezíveis os efeitos de parede.

O autor ainda provou que na base do recipiente que foi realizado os experimentos, tem-se nula a velocidade do sólido e do fluido, ou seja, a restrição cinemática. Assim d'Ávila (1978) escreveu o modelo adimensionalizado representado pelas seguintes equações:

$$M \frac{\partial \varepsilon_f}{\partial T} + (1 - \varepsilon_f) \frac{\partial V}{\partial Z} - V \frac{\partial \varepsilon_f}{\partial Z} = 0 \quad (2.18)$$

$$(1 - \varepsilon_f) \left(\frac{\partial V}{\partial T} + V \frac{\partial V}{\partial Z} \right) + S \frac{dP}{d\varepsilon_f} \frac{\partial \varepsilon_f}{\partial Z} = -AV + B(1 - \rho_f) \quad (2.19)$$

onde a Tabela 2 demonstra as variáveis adimensionais utilizadas para a simplificação das equações citadas. Nestas equações, v_s e v_f são, respectivamente, velocidades do sólido e fluido, ε_s é a concentração volumétrica da fase sólida, ε_f concentração volumétrica da fase fluida, ρ_f e ρ_s referem-se a massa específica do fluido e sólido respectivamente, T_s é a tensão nos sólidos.

Tabela 2 Equações simplificadoras. Fonte: D'ÁVILA, 1978.

$M = \frac{z_0}{v_{s0} t_0}$ (2.20)	$V = \frac{v_s}{v_{s0}}$ (2.21)	$T = \frac{t}{t_0}$ (2.22)	$Z = \frac{z}{z_0}$ (2.23)
$P = \frac{P_s}{P_{s0}}$ (2.24)	$S = \frac{P_0}{\rho_s v_{s0}^2}$ (2.25)	$A = \frac{\mu z_0}{\rho_s v_{s0} K(\varepsilon_f)}$ (2.26)	$B = \frac{(\rho_s - \rho_f) g z_0}{\rho_s v_{s0}^2}$ (2.27)

As condições iniciais aplicadas no sistema das equações (2.18) e (2.19) são:

$$T = 0 \quad (2.28)$$

$$V = V_0(Z) \quad (2.29)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{f0}(Z) \quad (2.30)$$

As equações diferenciais obtidas apresentam caráter hiperbólico, assim, ocorreu o surgimento de duas interfaces, ascendente e descendente, representadas pelo líquido clarificado e sedimento. A evolução das interfaces no tempo pode ser calculada a partir das equações abaixo:

$$\frac{dZ}{dT} = \frac{1}{M} \left(V - \sqrt{-K \frac{dP}{d\varepsilon_f}} \right) \quad (2.31)$$

$$\frac{dZ}{dT} = \frac{1}{M} \left(V + \sqrt{-K \frac{dP}{d\varepsilon_f}} \right) \quad (2.32)$$

Na representação gráfica na Figura (2.8) é demonstrado a interface superior e inferior.

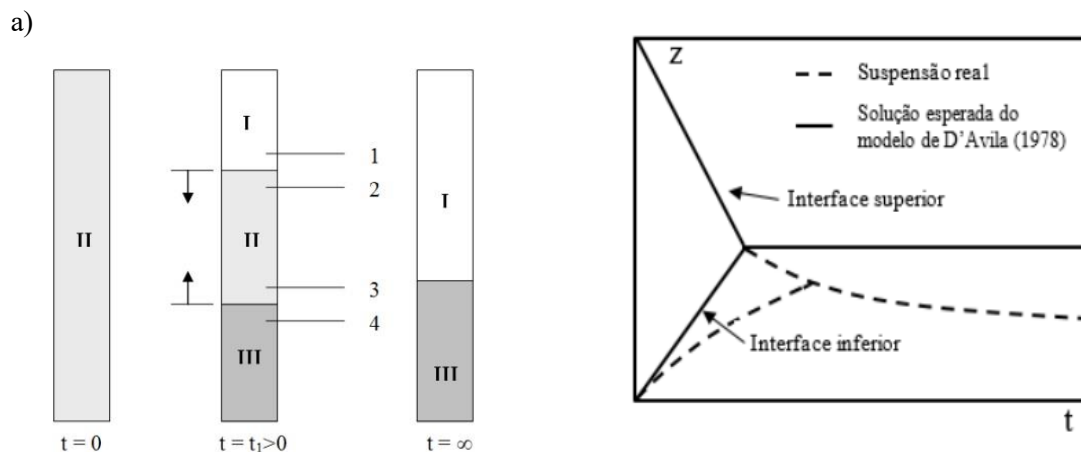


Figura 2.8 A) Regiões I, II e III da sedimentação em batelada delimitadas pelas discontinuidades: interface descendente e interface ascendente. B) Modelo de d'Ávila, Fonte: (AROUCA, 2007).

Então d'Ávila provou matematicamente e através de hipóteses que em seu modelo existe a formação de três regiões. As distintas áreas no processo de sedimentação são denominadas como: região de clarificação, região de sedimentação e a região onde ocorre a deposição de sólidos conhecida como zona compactada. A região delimitada pelas interfaces superior e inferior podem, através da equação da continuidade e do movimento e equações constitutivas, serem modeladas. Contudo as regiões de discontinuidades não permitem o uso da lei da conservação devido aos saltos nos valores de propriedades acima e abaixo das interfaces, como concentração e pressão nos sólidos. Assim d'Ávila (1978)

apresentou equações para esses saltos que relacionam as propriedades da região. Além do mais, o método do autor não permite obter dados e informações sobre a zona de compressão.

Tiller e Leu (1980) determinaram equações constitutivas para a tensão dos sólidos e a permeabilidade do meio para sedimentos compressíveis, juntamente com a extração de parâmetros. Os autores realizaram testes experimentais em células de compressão e permeabilidade para obtenção de parâmetros que envolvem as equações constitutivas. Para a pressão nos sólidos têm-se Equação 2.33 desenvolvida por Tiller e Leu (1980), a qual P_a , ε_{sc} e β são os parâmetros determinados para o modelo abaixo.

$$P_s = P_a \left[\left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{sc}} \right)^{1/\beta} - 1 \right]. \quad (2.33)$$

Tiller (1981) desenvolveu um conjunto de equações para demonstrar a sedimentação de sólidos compressíveis, a partir da comparação com a da teoria imposta por Kynch (1952). A maioria dos estudos relatados na literatura referem-se apenas à interface superior descendente e omitem a ascendente. Em seu modelo o autor assume que as características se originam na superfície do sedimento, o qual a velocidade do líquido ascendente afeta a taxa de sedimentação das partículas. Tal método demanda o monitoramento das interfaces, sendo que a superior é representada por H e a inferior por L, de acordo com a Figura 2.9.

Dixon (1977) considerou as equações da continuidade e do momento para sedimentação em batelada. Ao explorar o balanço de momento sobre a partícula sólida, incluiu-se forças atuantes como de arraste e de compressão do sólido. Assim, determinou-se que as forças gravitacionais e de arrastes se encontram em equilíbrio na região de sedimentação livre, ao desconsiderar os efeitos inerciais de aceleração da partícula.

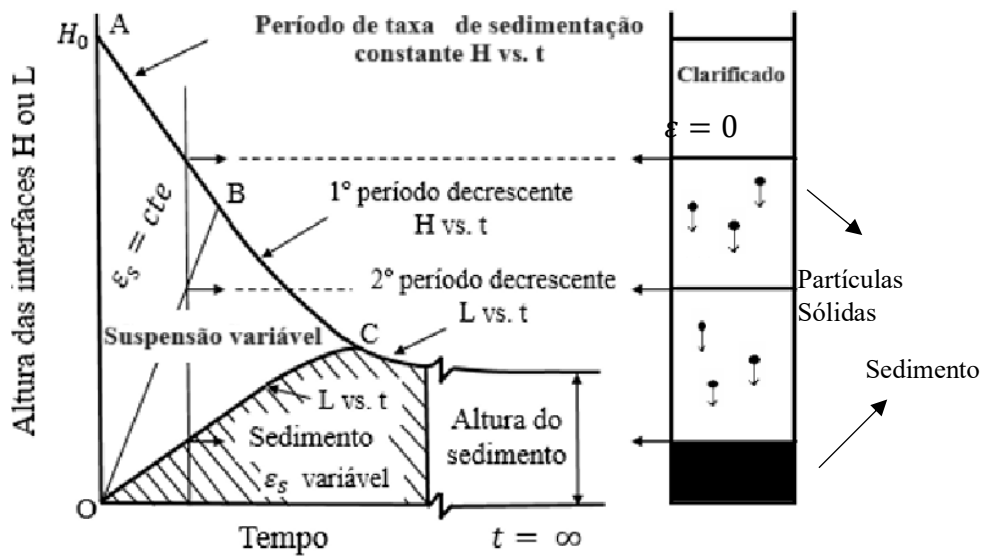


Figura 2.9 Interfaces ascendente e descendente. Fonte: Adaptado de TILLER, 1981.

Concha e Bustos (1987) analisaram o processo de sedimentação em suspensões propondo alterações nas condições de contorno proposta pela teoria, $\varepsilon_s(z = 0, t) = \varepsilon_{sm}$. A partir dessas modificações desenvolveram uma nova condição, Equação 2.34:

$$\left(\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z}\right)_{z=0} = \frac{(\rho_s - \rho)g\varepsilon_s}{\frac{dP_s}{d\varepsilon_s}}, (z = 0, t), \quad (2.34)$$

em que ε_s é a concentração volumétrica de sólidos, ρ_s e ρ são densidade de sólido e fluido, g gravidade, e P_s a pressão nos sólidos. Foi observado pelos autores, que no caso de suspensões floculentas, que seu método e a teoria de Kynch divergem no resultado, uma vez que o estudo de Kynch tem validade apenas para concentrações menores do que a crítica.

Concha e Bustos (1987) desenvolveram as Equação 2.35 e Equação 2.36, com base no modelo dinâmico para o processo de sedimentação em batelada. Desta forma, deixando explícito a influência que os parâmetros exercem na pressão em sólidos e nas linhas equi-concentrações.

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial z} = 0, \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial q_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left[q_s^2 + \frac{P_s(\varepsilon_s)}{\rho_s} \right] = \frac{\Delta \rho g \varepsilon_s}{\rho} + \frac{\Delta \rho g q_s}{\rho_s U(\varepsilon_s)}. \quad (2.36)$$

Sendo que a diferenciação de densidade sólido-líquido é dada por Δp , $U(\varepsilon_s)$ e $P_s(\varepsilon_s)$ são respectivamente os valores da velocidade de sedimentação livre e a pressão nos sólidos, sendo que Concha e Bustos (1987) representam essas a partir das seguintes equações:

$$U(\varepsilon_s) = u_\infty (1 - \varepsilon_s)^{\alpha+1} \quad (2.37)$$

$$P_s = a \exp(b\varepsilon_s) \quad (2.38)$$

As equações acima propostas por Concha e Bustos (1987) possuem como parâmetros experimentais u_∞ , a e b , e como condição inicial e condições de contorno têm-se:

$$\varepsilon_s(z > 0, t = 0) = \varepsilon_{s0}, \quad (2.39)$$

$$q_s(z > 0, t = 0) = \varepsilon_{s0} U(\varepsilon_{s0}), \quad (2.40)$$

$$q_s(z = 0, t > 0) = 0. \quad (2.41)$$

Concha e Bustos (1987) resolveram o conjunto de equações citadas pelo método de diferenças finitas e obtiveram as curvas de equi-concentrações. Os autores observaram que o comportamento se torna linear com o tempo para as propriedades próximas da concentração inicial, porém quando as concentrações atingem elevados valores ocorre uma divergência com a teoria de Kynch (1952). Assim concluíram que a teoria de Kynch (1952) não é adequada para suspensões flocculentas, mas sim para suspensões diluídas.

França, Massarani e Biscaia Jr (1999) estudaram a caracterização do meio poroso no processo de sedimentação por meio de equações constitutivas. O método de estudo inclui um modelo que representa o processo de sedimentação considerando as zonas de sedimentação livre e de compressão, conforme a Figura 2.10.

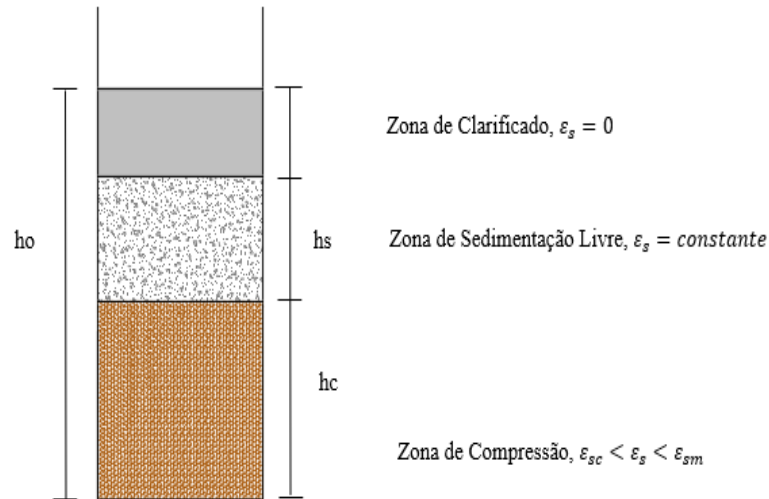


Figura 2.10 Representação esquemática das zonas de sedimentação. Fonte: Adaptado de FRANÇA, MASSARANI E BISCAIA JR, 1999.

Através de testes de filtração, estimaram os parâmetros das equações de permeabilidade e pressão nos sólidos, utilizando dados experimentais da interface descendente. Cada zona teve como base a equação da continuidade e do movimento da fase sólida. Assim, foi possível determinar a equação que descreve a velocidade de queda da interface superior (v_{sup}) e a variação de altura (h), Equação 2.42 e Equação 2.43.

$$v_{sup} = k_2 \left(\frac{1 - e^{-k_1 t}}{k_1} \right), \quad (2.42)$$

$$h = h_o - \lambda \left(t - \frac{1 - e^{-k_1 t}}{k_1} \right). \quad (2.43)$$

Sendo que k_1 , k_2 e λ são correspondidos por:

$$k_1 = \left(\frac{\mu}{k(\varepsilon_{s0})\rho_s \varepsilon_{s0}} \right) \quad (2.44)$$

$$k_2 = \left(\frac{(\rho_s - \rho_l)g}{\rho_s} \right) \quad (2.45)$$

$$\lambda = \frac{k_1}{k_2} \quad (2.46)$$

onde, μ representa a viscosidade do líquido, ε_{s0} e g , a concentração volumétrica inicial dos sólidos e a gravidade. Já ρ_s e ρ_l são respectivamente a massa específica do sólido e líquido. O termo k é a permeabilidade do meio, que faz conexão com a porosidade através

dos parâmetros (α e γ) determinado pela relação empírica da expressão Kozeny-Carman, Equação 2.47.

$$K(\varepsilon_s) = (\alpha + \gamma\varepsilon_s) \frac{(1 - \varepsilon_s)^3}{\varepsilon_s^2} \quad (2.47)$$

As regiões que formam o sedimento, denominado de zona de compressão, estão sujeitas a forças de compressão, evidenciando a existência da interação sólido-sólido. Ainda neste contexto têm-se a concentração das partículas variando com o tempo. além do mais os autores utilizaram as hipóteses apresentadas por d'Ávila (1978) e a lei de Darcy para caracterizar a força resistiva. Para essa zona especifica as equações a seguir a descrevem:

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} - \frac{\partial q_s}{\partial z} = 0, \quad t > 0; 0 < z < h_c \quad (2.48)$$

$$\rho_s \left[\frac{\partial q_s}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{q_s^2}{\varepsilon_s} \right) \right] = \frac{\partial P_s}{\partial z} - \frac{\mu q_s}{K \varepsilon_s} + (\rho_s - \rho_l) g \varepsilon_s \quad (2.49)$$

As condições de contorno foram estabelecidas por meio da ausência de fluxo de sólidos na base do recipiente teste, e no topo do sedimento (h_c) a concentração de sólidos (ε_s) atinge a concentração crítica (ε_{sc}), e a pressão nos sólidos é nula, como mostrado abaixo:

$$z = 0; q_s = \varepsilon_s; v_s = 0 \quad (2.50)$$

$$z = h_c(t); \varepsilon_s = \varepsilon_{sc}; P_s = 0 \quad (2.51)$$

O cálculo da pressão efetiva dos sólidos ocorreu pela equação proposta para processos de filtração por Tiller e Leu (1980). Mas de acordo com os autores, o modelo não foi capaz de incorporar os efeitos de compressibilidade do sedimento. Então, com a intenção de formular equações constitutivas mais apropriadas para descrever o leito de partículas foi proposto uma nova expressão fundamentada no modelo de adsorção de Langmuir para pressão nos sólidos, Equação 2.52.

$$P_s(\varepsilon_s) = P_a \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{sc})}{(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_s)} \quad (2.52)$$

Sendo que a altura da zona de compressão varia com o tempo, os autores propuseram equações que permitem a integração entre as regiões de sedimentação livre e compressão. A equação de restrição das alturas e a equação balanço de massa global foram apresentadas para solucionar o problema de fronteira móvel. Já a concentração média dos sólidos ($\bar{\varepsilon}_s$) na zona de compressão foi obtida pela integração representada na Equação 2.55.

$$h_s(t) + h_c(t) = h(t) \quad (2.53)$$

$$\varepsilon_{s0}h_s(t) + \bar{\varepsilon}_s h_c(t) = \varepsilon_{s0}h(t) \quad (2.54)$$

$$\bar{\varepsilon}_s = \frac{1}{h_c(t)} \int_0^{h_c} \varepsilon_s(z, t) dz. \quad (2.55)$$

Ribeiro *et al.* (2017) avaliaram a capacidade predição dos modelos matemáticos simplificados para descrever a sedimentação de partículas adensantes em fluidos de perfuração. Inicialmente os autores realizaram experimentos de sedimentação em suspensões com barita e calcita a concentrações volumétricas de 6,7%, 12% e 20% de sólidos. A altura da interface entre a zona de clarificado foi avaliada assim como a zona de concentração constante ao longo do tempo. Para a primeira abordagem fez-se uso dos modelos conservativos, com base nas leis de conservação de massa e em funções de densidade de fluxo. A velocidade relativa entre o sólido e o fluido foi considerando uma função da concentração volumétrica de sólidos. Já para o modelo simplificado, em uma segunda abordagem, utilizou-se um conjunto de equação da continuidade e do movimento, levando-se em consideração as forças de interação da fase líquida e da fase sólida. Na última etapa do trabalho, ocorreu uma simulação computacional com os modelos desenvolvidos no estudo. A comparação dos perfis de concentração obtidos pela simulação e pelos dados experimentais obtidos indicaram que o resultado do modelo proposto se mostrou satisfatório para as três concentrações volumétricas iniciais. A predição do modelo para queda da interface de clarificação ao longo do tempo se aproximou das informações experimentais no início e fim da sedimentação. Mas quando

a zona de clarificado se aproxima da zona compactada, o modelo não foi capaz de prever a altura da interface.

Andrade (2018) estudou um modelo matemático introduzindo as equações da continuidade e do movimento para prever a dinâmica da sedimentação de partículas sólidas. Foi possível avaliar os parâmetros da sedimentação com ênfase na influência da distribuição de tamanho de partícula. Utilizou-se três métodos estatísticos computacionais: Monte Carlo, Monte Carlo via Cadeias de Markov (MCMC) e Randomized Maximum Likelihood (RML). O emprego do método de Monte Carlo analisou de maneira direta a incerteza dos parâmetros do modelo fenomenológico nos resultados da simulação. Os resultados destacam que não deve ser negligenciado a influência das incertezas, pois afetam a estimação paramétrica do problema, tendo como possibilidade de gerar previsões errôneas das características do fenômeno.

Rocha (2018) investigou a sedimentação em batelada em várias concentrações através da técnica de eletro condutividade. A técnica permite avaliar a dinâmica da sedimentação e a altura da suspensão obtendo perfis de concentração de sólidos por meio da eletrocondutividade. O autor desenvolveu também um modelo matemático com base em um sistema de equações diferenciais parciais (EDPs), com intuito de descrever o processo de sedimentação dos sólidos adensantes presente em fluido base óleo. O modelo desenvolvido por Rocha (2018) simula o perfil dinâmico das regiões de sedimentação relatado por Kynch (1952). As simulações realizadas pelo autor, adotaram uma unificação das zonas de sedimentação livre, transição e formação de sedimento em uma zona denominada de região de espessamento, de acordo com a Figura 2.11. Essa zona foi considerada como uma região em que a fração volumétrica de sólidos está entre a fração de sólidos inicial e a fração máxima de sólidos, observada na base da proveta.

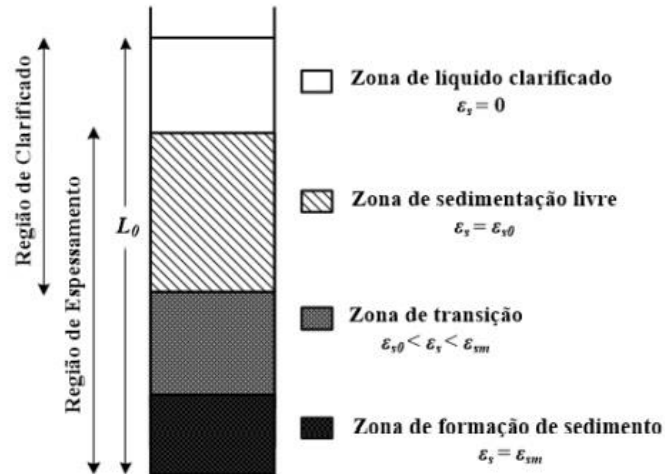


Figura 2.11 Regiões de sedimentação adotadas por Rocha (2018) com base nas zonas de sedimentação estudadas por Kynch. Fonte: ROCHA, (2018)

O modelo matemático desenvolvido por Rocha (2018) para prever a sedimentação de sólidos, fez uso de equações diferenciais parciais (EDPs), abrangendo as equações de conservação de massa e quantidade de movimento linear com adições de correlações empíricas. Para um escoamento unidimensional, teve como base nas equações da continuidade (2.56) e do movimento (2.56) em fase sólida, considerando a direção z .

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon_s v_s)}{\partial z} = 0, \quad (2.56)$$

$$\rho_s \varepsilon_s \left(\frac{\partial v_s}{\partial t} + v_s \frac{\partial v_s}{\partial z} \right) = \frac{\partial T_s}{\partial z} + m + \varepsilon_s (\rho_s - \rho_l) g. \quad (2.57)$$

Nas equações (2.42) e (2.43) apresentadas acima têm-se que ε_s , v_s , T_s e ρ_s , são respectivamente a concentração volumétrica, velocidade, tensão e densidade da fase sólida. Já t , z e m fazem referência ao tempo, posição e a força resistiva, respectivamente.

A hipótese direcionada no estudo do sistema sólido e fluido é um meio isotrópico (as propriedades físicas permanecem a mesma em todas as direções), o qual d'Ávila e Sampaio (1977) representaram o tensor tensão na expressão a seguir:

$$T_s = -p_s I + T'_s, \quad (2.58)$$

onde p_s representa a pressão (seção arbitrária do sensor), T'_s e I , são respectivamente a tensão extra e a matriz tensor identidade. d'Ávila e Sampaio também propuseram

adicionalmente três teoremas que representam as tensões das suspensões. Assim, para descrever os perfis de concentração durante a sedimentação no fluido estudado, o teorema estabelece que a tensão adicional da mistura tem uma influência exclusiva na porosidade do meio, implicando que o tensor tensão tem apenas componentes normais à superfície de contato, que dependem apenas da porosidade.

O modelo de Rocha (2018) previu o comportamento da sedimentação de sólidos adensantes através de um conjunto de equações. Além do mais, o autor adicionou a Lei de Potência como modelo reológico para abordar o equilíbrio das forças que atuam no sistema. O modelo assumiu algumas hipóteses, como de ser um deslocamento unidirecional dos sólidos, gerando a equação abaixo:

$$u_s = \frac{1}{v_{s0}} \left\{ \frac{K}{M(1 - \varepsilon_s)^{1-n}} \left[\frac{d_p}{\theta(\emptyset)} \right]^{n-1} \left(\frac{\rho_{susp}}{\rho_{susp} - \rho_s \varepsilon_{s0}} \right) \left[\varepsilon_{s0} (\rho_s - \rho_f) g - \frac{dP_s}{d\varepsilon_s} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (2.59)$$

A equação 2.59 representa a velocidade da partícula sólida que envolve parâmetros como v_{s0} , velocidade inicial do sólido, K que é a permeabilidade do meio, M e n , índices de consistência e comportamento do fluido e o d_p que é o diâmetro da partícula. Também vale destacar que existe uma correlação com a pressão dos sólidos, P_s , ε_{s0} é a concentração inicial dos sólidos e as densidades da suspensão e do sólido (ρ_{susp} e ρ_s).

As seguintes condições de contorno foram propostas:

$$CI: \varepsilon_s(z, t = 0) = \varepsilon_{s0}, \quad (2.60)$$

$$CC1: q_s = \varepsilon_s v_s(z = 0, t) = 0, \quad (2.61)$$

$$CC2: q_s = \varepsilon_s v_s(z = L_0, t) = 0. \quad (2.62)$$

Rocha (2018) concluiu que as equações fenomenológicas permitiram propor modelos para sedimentação em batelada. A validação ocorreu com resultados experimentais possibilitando compreender o processo da sedimentação dos adensantes. O modelo desenvolvido simulou as regiões de sedimentação conforme visualizadas por

Kynch (1952). Sua predição descreveu de maneira concisa a região de clarificado, quanto a de espessamento, apontando a eficiência do modelo. Em suma, os resultados sugeriram que modelo proposto mostrou uma robustez para descrever diferentes comportamentos ao longo da investigação do processo de sedimentação.

Fagundes (2019) investigou o fenômeno da sedimentação em um conjunto de partículas no fluido base óleo por meio Técnica de Atenuação de Raios Gama. A técnica permitiu monitorar a concentração volumétrica em várias posições ao longo do tempo. Durante o teste experimental de sedimentação observou que foi formado uma região ausente de partículas sólidas. Além do mais foi realizado um estudo reológico que se notou um comportamento pseudoplástico do fluido. Fagundes (2019) também calculou a velocidade de sedimentação e a permeabilidade do meio poroso das partículas presente no fluido. O autor propôs um modelo matemático através da equação constitutiva para pressão nos sólidos, força resistiva, esfericidade e modelo reológico.

Pinto (2020) em seu estudo propôs modelos de sedimentação não-isotérmicos com intuito de avaliar a dinâmica da sedimentação e seu perfil axial em suspensões com material adensante como a barita em diversas temperaturas. Os modelos foram fundamentados na mecânica do contínuo usaram-se então as leis da conservação da massa e do movimento para descrevê-los. Para a pressão de sólidos, permeabilidade do meio e função fez uso das equações constitutivas e tais parâmetros foram estimados utilizando dados experimentais de um fluido base óleo. Assim resultou em dois modelos, o primeiro tem-se o cálculo da velocidade dos sólidos (Equação 2.63) e o segundo (Equação 2.63) calcula o fluxo dos sólidos:

$$\frac{dP_s}{d\varepsilon_s} = \frac{P_{sref}\beta}{\varepsilon_s^2} \exp\left[-\beta\left(\frac{1}{\varepsilon_s} - \frac{1}{\varepsilon_{sref}}\right)\right] = \frac{A}{\varepsilon_s^2} \exp\left[-\beta\left(\frac{1}{\varepsilon_s} - \frac{1}{\varepsilon_{sref}}\right)\right]. \quad (2.63)$$

Para descrever de maneira concisa o fluxo de sólidos representado por Q_s , definiu-se como coeficiente de fluxo de sólidos Γ .

$$Q_s = \left\{ \Gamma \left[-\frac{dP_s}{dz} \right] \right\}^{\frac{1}{n}}. \quad (2.64)$$

Ainda em seu estudo, Pinto (2020) incorporou condições não isotérmicas na sedimentação do material sólido e efeito da tensão limite de escoamento, considerando que o efeito da temperatura se limita as propriedades reológicas do fluido. O efeito da temperatura foi incorporado a partir de um fator de correção do tipo Arrhenius, Equação 2.65 e comparado ao modelo WLF (Equação 2.65).

$$\alpha_T = -\frac{\Delta\tilde{H}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad (2.65)$$

$$\alpha_T = \frac{-c_1(T - T_{ref})}{c_2 + (T - T_{ref})} \quad (2.66)$$

Desta forma $\Delta\tilde{H}$ é considerado como a energia associada ao escoamento, o R a constante dos gases, T a temperatura, T_{ref} a temperatura de referência. A correção da viscosidade do fluido (η) com a temperatura (T), foi realizada a partir da seguinte equação:

$$\eta(T) = \alpha_T \eta_{ref} = \eta_{ref} \exp \left[-\frac{\Delta\tilde{H}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right], \quad (2.67)$$

onde η_{ref} é considerado a viscosidade do fluido em uma temperatura de referência T_{ref} . A forma final descrita por Pinto (2020), utilizando o modelo de potência para a viscosidade aparente, que

depende da temperatura e da taxa de cisalhamento, têm-se:

$$\eta(\dot{\gamma}_c, T) = M' \exp(\alpha_T) (\dot{\gamma}_c)^{n-1}. \quad (2.68)$$

De forma similar para o Hershel-Bulkley tem-se:

$$\eta(\dot{\gamma}_c, T) = \tau'_0 + M' \exp(\alpha_T) (\dot{\gamma}_c)^{n-1}. \quad (2.69)$$

2.4 Técnicas de Monitoramento da Concentração dos Sólidos em Processos de Sedimentação

Métodos de análise de concentração de sólidos investigam a dinâmica de sedimentação em uma suspensão. Essas metodologias proporcionam analisar o processo de deposição das partículas sólidas em meio fluido ao longo do tempo. Com tais técnicas torna-se possível estudar a separação dos sólidos em relação a fase líquida, devido a ação da gravidade e outras forças. Existem limitações e vantagens para cada técnica sendo a escolha da mais apropriada determinada pelos objetivos de cada estudo.

2.4.1 Técnicas em Provetas

Testes em provetas, Figura 2.12, são os mais antigos e usuais para investigar e visualizar o fenômeno da sedimentação em fluidos não opacos. Em contrapartida, a visualização da interface descendente é dificultada no caso de suspensões opacas. É um teste de sedimentação em batelada, no qual a queda da interface superior da suspensão é monitorada (Eler, 2012). Nesse procedimento, a suspensão é adicionada em uma proveta graduada após sua preparação, permitindo a observação da sedimentação por meio da visualização da queda da interface descendente ao longo do tempo. Com base nas medições aquisitadas de altura da interface de sedimentação em função do tempo é possível calcular a velocidade de sedimentação do material sólido. A figura 2.13 apresenta uma curva típica, que descreve a variação da interface descendente ao longo do tempo de sedimentação. O gráfico foi confeccionado a partir dos dados medidos de altura da interface durante o teste experimental.



Figura 2.12 Teste de proveta graduada para avaliar a sedimentação com fluidos contendo calcita e barita.
Fonte: AUTOR, 2023.

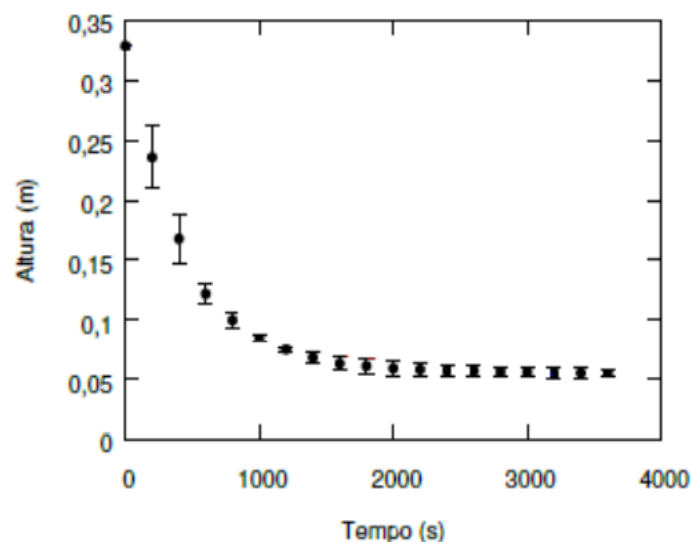


Figura 2.13 Curva de sedimentação representando o deslocamento da interface superior com o tempo. Fonte: MESSIAS Jr., 2016.

Na técnica em proveta é possível observar a presença da interface e a movimentação das partículas com velocidades diferentes, até a formação de uma estrutura compacta. Simultaneamente se visualiza a formação de uma região de líquido clarificado, a medida que a interface se move para o fundo do recipiente. Como para suspensões opacas não é permitido a visualização da sedimentação e nem da interface, alternativas metodológicas são utilizadas para tais fins.

2.4.2 Atenuação por Raios Gama(γ)

Outra abordagem experimental não destrutiva, tem como base na atenuação por raios gamas (γ) que é utilizada para obter dados de sedimentação em batelada, através de uma unidade de radioisótopos. A fonte de raios gamas provém do amerício (Am^{241}) ou o Césio. Por um feixe de fótons a fonte de raios gamas (γ) é emitido e recebido por um sistema de detecção com a passagem do feixe por um meio de atenuação, Figura 2.14. A concentração de sólidos pode influenciar na radiação emitida (A) que incide pela coluna de sedimentação a uma intensidade I_0 , parte pode ser dispersa (B), absorvida ou atravessar o meio resistindo o espalhamento (C) (AROUCA, 2007).

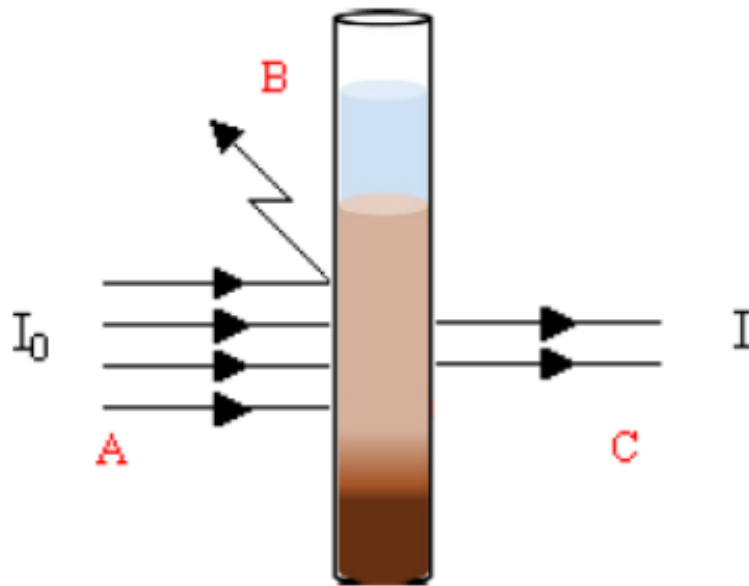


Figura 2.14 Ilustração esquemática da atenuação de raios gama em uma coluna de sedimentação. Fonte: (AROUCA, 2007)

Ao atravessar o meio físico, a coluna de sedimentação apresentada acima, têm-se a variação da intensidade do feixe colimado de raios gama com uma energia E , que se relaciona com a densidade e a espessura do recipiente, e é expressa pela equação de Lambert, Equação 2.70 (GARDNEY; ELY-JR, 1967),

$$I(E) = I_0 \exp(-\sigma(E)\rho y) \quad (2.70)$$

a qual I_0 refere-se à intensidade do feixe antes da passagem pelo meio e já I após. A densidade do meio é representada por ρ , sua espessura é y , e o coeficiente de atenuação mássico é $\sigma(E)$, que realiza a medição da probabilidade de absorção de radiação pelo meio.

Quando o meio é uma mistura sólido-líquido tem-se um fluido livre de sólidos como estado de referência. Ao representar o logaritmo da atenuação de um feixe monoenergético tem-se a Equação 2.71, que mostra que é uma função linear da concentração volumétrica nos sólidos contidos (MOREIRA *et al.*, 2017). Os termos R_0 e R na equação, representam a intensidade do feixe que atravessa a proveta

$$\ln \frac{R_0}{R} = B\varepsilon_s \quad (2.71)$$

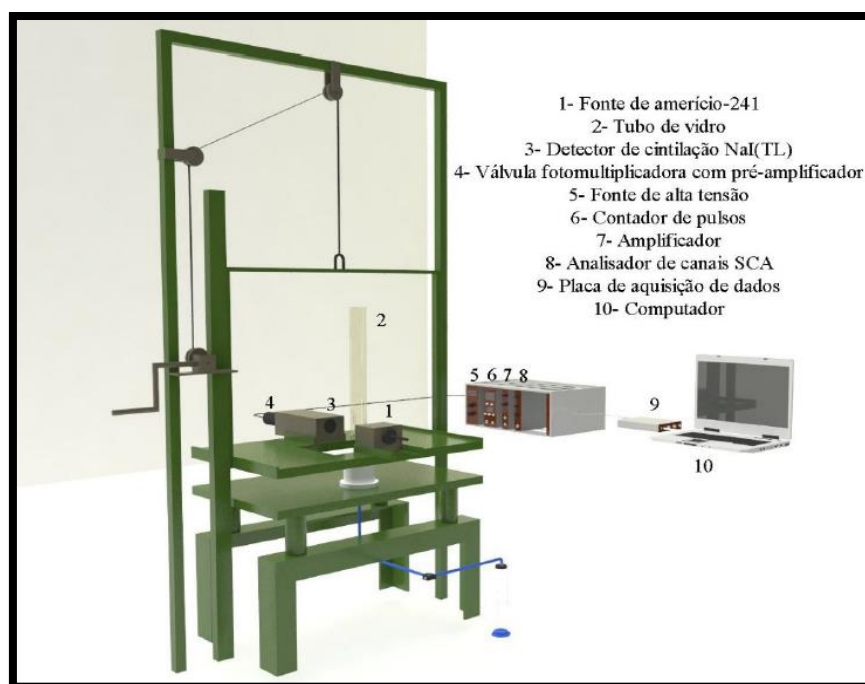


Figura 2.15 Unidade de aplicação de radioisótopos. Fonte: FAGUNDES, 2015.

Damasceno *et al.* (1991) estabeleceram os parâmetros das equações constitutivas para a tensão nos sólidos e permeabilidade do meio apenas para a concentração local de sólidos. A técnica utilizada para determinarem esses parâmetros foi de Atenuação de Raios Gama. Os experimentos foram estáticos para a pressão dos sólidos e dinâmicos para a sedimentação. De acordo com os autores, a permeabilidade aumentou de maneira considerável a dispersão dos pontos experimentais pelo fato do escoamento não ser unidimensional. Além disso, os resultados mostraram alto grau de reprodutibilidade e baixo desvio padrão para a tensão nos sólidos.

A técnica de raios gama (TARG) permite obter a distribuição de concentrações volumétricas de sólidos em meios concentrados. Esta abordagem tem uma vantagem de não haver relação com as propriedades da suspensão, como viscosidade, temperatura e pressão. Porém a sua aplicabilidade está restrita a processos de sedimentação mais lentos, garantindo uma alta precisão na aquisição de dados (WILLIAMS *et al.*, 1990).

2.4.3 Monitoramento da sedimentação por pressão hidrostática

Um método recente de monitorar a sedimentação das partículas sólidas na literatura científica é a partir da pressão da coluna de fluido exercida sobre um transmissor

de pressão. A investigação avalia a deposição das partículas sólidas em um recipiente teste avaliando a variação de pressão de maneira proporcional a concentração de sólidos.

Nocoñ (2010) conduziu testes para acompanhar a sedimentação de partículas sólidas por meio de transdutor de pressão. De acordo com seus estudos mostrou-se que é possível investigar a sedimentação medindo a pressão hidrostática a uma distância da base da coluna teste. Desenvolveu uma planta piloto que teve como objetivo testar algoritmos de controle utilizados para otimizar o tempo de remoção do líquido clarificado presente na coluna de sedimentação, Figura 2.16.



Figura 2.16 Planta piloto de sedimentação em batelada projetada e operada no Instituto de Controle Automático. Fonte: NOCÓN 2010.

O processo de sedimentação ocorreu em uma coluna de decantação com 20cm de diâmetro na qual foi inserido o transdutor de pressão para realizar medidas do nível do líquido. O transdutor foi conectado por meio de um tubo em formato de U invertido, impedindo a entrada de sólidos no sistema, Figura 2.17. Para a investigação da sedimentação foi utilizado um fluido contendo um mineral de argila de halloysite com densidade de 2.0 g/cm^3 .

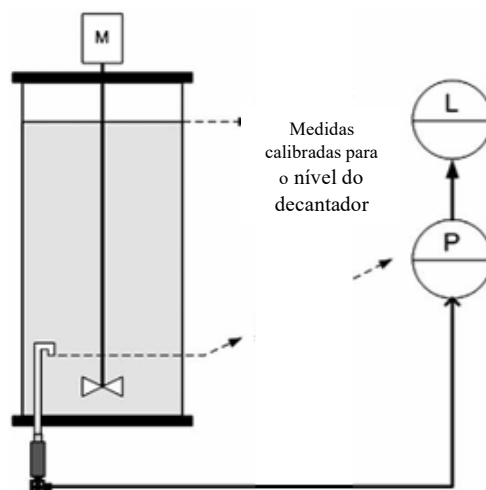


Figura 2.17 Diagrama da planta piloto de sedimentação. Fonte: NOCÓN, (2010).

Nos seus estudos, Nocoñ (2010) comparou resultados de simulação com experimentais. Foi utilizada a planta piloto experimental que registrou a pressão em diferentes concentrações iniciais de sólidos, a $X_0 = 6,8[\text{g/l}]$, $X_0 = 17,4 [\text{g/l}]$, e $X_0 = 21[\text{g/l}]$. A figura 2.18 apresenta os resultados de simulação a concentração de $X_0 = 6,8[\text{g/l}]$, mostrando altura medida em centímetros por tempo em minuto:

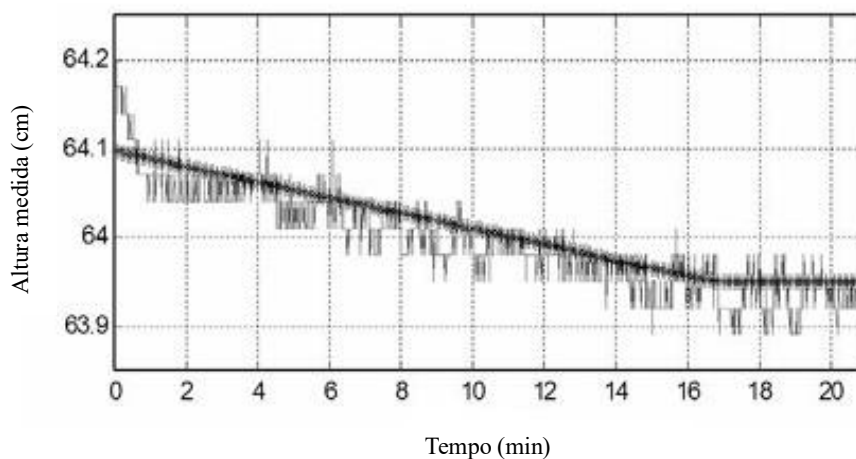


Figura 2.18 Resultado típico obtido no estudo realizado por Nocón (2010). Fonte: NOCÓN 2010.

Medições de altura foram detectadas pelo transdutor de pressão e observou-se a influência da diminuição da densidade na região superior da coluna de decantação. O autor esclarece que a redução da densidade ocorreu devido a deposição das partículas sólidas na região inferior da coluna, o que se espera devido a força gravitacional. A diminuição da pressão hidrostática no nível de 20 cm também foi identificada. Assim o

autor explicita que a altura medida no equipamento, a partir da pressão hidrostática também foi impactado por meio do fenômeno. Já a simulação mostra algumas disparidades ao ser comparada aos resultados experimentais. Inicialmente no processo de sedimentação os dados de simulação apresentam valores menores do que os experimentais. De acordo com Nocoñ (2010), essa ocorrência deriva das correntes de misturas atenuantes que aumenta o nível assim que se inicia o processo. Outras discrepâncias também observadas fazem relação com o tamanho das partículas presente no fluido. Sendo que partículas de tamanhos diferentes apresentam velocidades de sedimentação diferentes, a variação na inclinação da medição de pressão sugere que diferentes componentes da suspensão influenciam no processo.

Pasquini *et al.* (2023) realizaram estudos da sedimentação no espaço anular de tubos verticais, por meio de medidores de pressão diferencial e ajustou um modelo com base em dados experimentais. Para as medições utilizou-se quatro transmissores diferenciais de pressão para determinar as propriedades relacionadas à sedimentação. O aparato experimental, Figura 2.19, consiste em uma tubulação vertical de acrílico com 16 metros de altura e 110 mm de diâmetro interno, com uma distância de 38,3 mm entre a tubulação e o espaço anular.

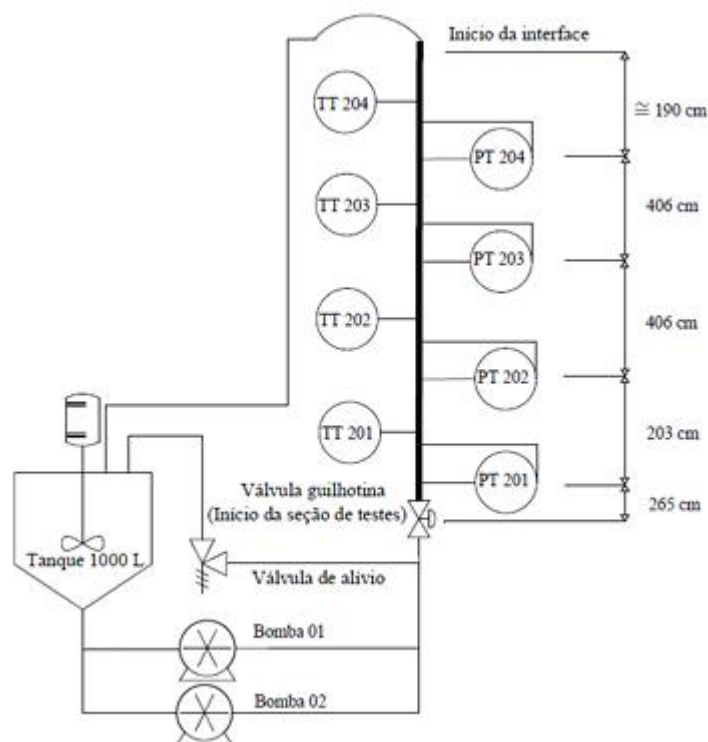


Figura 2.19 Representação esquemática do aparato experimental. Fonte: PASQUINI *et al.* 2023.

Souza *et al.* (2022) realizaram estudos de sedimentação com suspensões de barita na unidade de acrílico de para monitorar a concentração de sólidos ao longo do tempo por meio da técnica de investigação de pressão. Na investigação os autores explicitaram que as leituras dos canais detectaram por meio de dados de pressão diferencial, a dinâmica da sedimentação com a passagem da interface nos pontos, pontos de medição dos transmissores. Assim o autor concluiu que a técnica foi capaz de monitorar a sedimentação por meio do diferencial de pressão. E também foi identificado a média da pressão entre dois pontos de leitura indicando a capacidade do transdutor em obter dados de concentração volumétrica local.

Os autores (Pasquini *et al.*, 2023) conduziram os testes em várias concentrações volumétricas, que foram obtidas por meio de análise visual, resultando em uma série de valores para a posição da interface entre o líquido clarificado e a zona de compactação. Além disso, identificou sete diferentes situações de sedimentação entre os transdutores de pressão. Os medidores de pressão foram inseridos na coluna, em posições denominadas de estação. Conforme observado na análise gráfica (Figura 2.20), o comportamento da concentração volumétrica (CV) na estação 1 (PT 201, medidor de pressão em relação a base da coluna) varia conforme a concentração volumétrica da mistura homogênea inicial aumenta. Esse fenômeno é justificado pela passagem de diferentes regiões de concentração através das tomadas de pressão. Em todas as estações o medidor de pressão, detectou a concentração de sólidos ao longo do tempo. Além do mais, o estudo conduziu uma análise da variação de concentração em relação à passagem das interfaces das regiões de líquido clarificado, sedimentação livre e região de transição entre as tomadas de pressão. Portanto, tornou-se possível compreender como a concentração se altera ao longo do processo de sedimentação em diferentes regiões da coluna de acrílico.

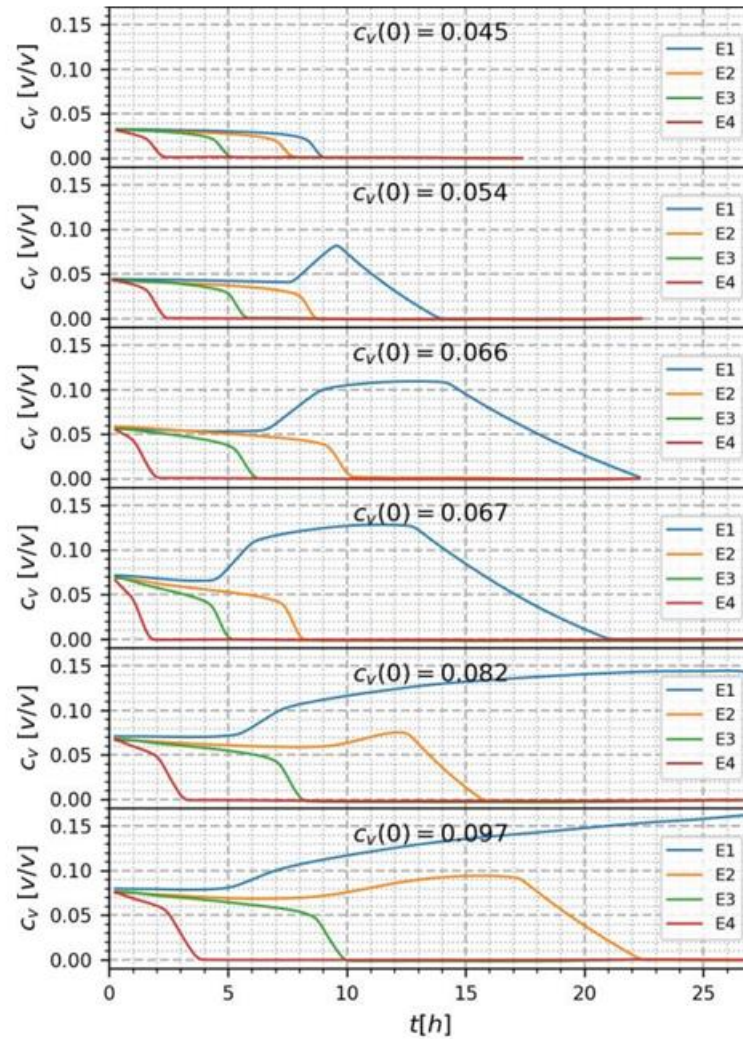


Figura 2.20 Concentração ao longo do tempo para todos os testes realizados. Fonte: PASQUINI et al. 2023.

2.4.4 Condutividade elétrica

Rocha (2018) investigou a sedimentação em uma unidade de bancada experimental que foi desenvolvida para obter o perfil de concentração de sólidos com o uso da condutividade elétrica. O aparato de testes que é uma coluna de acrílico foi desenvolvido no Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani. Em seu estudo, Rocha (2018) identificou a não homogeneidade na sedimentação de suspensões de barita. Alguns fenômenos foram observados pelos resultados experimentais, como aglomeração de partículas, várias interfaces, formação de canais preferenciais e fissuras na matriz porosa. Além disso, o autor mostrou que a técnica de condutividade elétrica é eficaz na

quantificação da sedimentação de partículas sólidas e permite estimar a altura do sedimento formado.

A Figura 2.21 apresenta os resultados típicos obtidos por Rocha *et al.* (2022) para a técnica de condutividade elétrica em experimento de sedimentação com suspensões de água e barita. Os resultados foram obtidos no monitoramento da condutividade elétrica em diferentes alturas ao longo da coluna. No gráfico, a curva verde representa a leitura na altura de 7,25 cm acima da base da coluna. Observa-se que ela apresenta um aumento na concentração até um patamar aproximadamente constante, assim como a curva rosa que representa a altura de 17,25 cm. Estas duas curvas indicam que a concentração na base aumenta pelo recebimento dos sólidos sedimentando até um valor constante. Assim, constatou-se a presença de um platô de concentração constante na região inferior durante a avaliação da dinâmica da sedimentação. A curva azul, que representa a leitura obtida pelo eletrodo posicionado na altura de 27,25 cm, mostra uma queda na concentração até a uma região que apresenta a tendência de alcançar um regime constante, assim como as curvas preta e vermelha. A queda da concentração indica a passagem da frente de sedimentação.

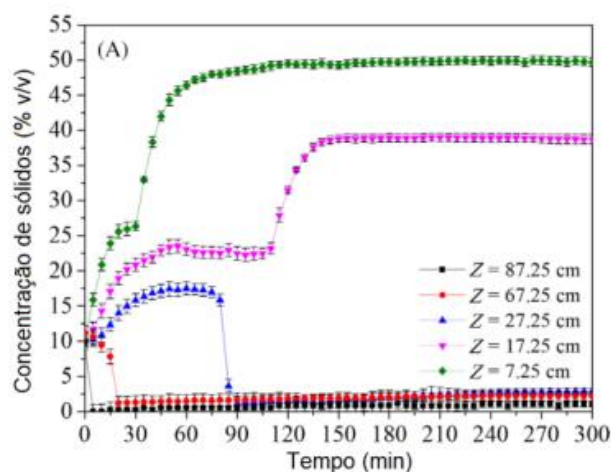


Figura 2.21 Monitoramento da concentração de sólidos por condutividade elétrica (adaptado de ROCHA *et al.*, 2022).

A técnica de condutividade elétrica se mostrou eficaz para aquisição de perfis quantitativos de concentração de sólidos para a dinâmica da sedimentação. A metodologia possibilita uma compreensão concisa da deposição das partículas sólida, envolvendo a velocidade de sedimentação em diferentes posições e tempo. Sendo assim a técnica surge com um meio eficaz na investigação do fenômeno, oferecendo uma abordagem de entendimento para compreender a sedimentação de partículas sólidas em suspensões

aquosas. Porém, uma limitação é que a técnica não é eficaz em presença de cloreto de sódio. Isso sugere que a presença desse composto interfere ou prejudica a eficácia da técnica, causando resultados imprecisos.

CAPÍTULO III

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Resumo: Para compreender a sedimentação das partículas sólidas em fluidos é necessário o monitoramento da concentração dos sólidos ao longo do espaço e tempo. Com este objetivo, unidades de sedimentação foram construídas para o monitoramento da concentração de materiais adensantes em fluidos de perfuração com medidores diferenciais de pressão para determinação na concentração de sólidos. Os experimentos foram realizados nas Unidades de Bancada I e II e na Unidade Piloto de Monitoramento da Concentração de Sólidos.

3.1 Unidades Experimentais

Os testes experimentais de sedimentação foram realizados em duas unidades de Bancada e em Unidade Piloto com o objetivo de avaliar o processo de sedimentação em diferentes condições de concentração e tipo de sólido. Assim, tornou-se possível avaliar a concentração de sólidos por meio da pressão ao longo do tempo. Os testes experimentais de sedimentação tiveram como objetivo de avaliar o processo de sedimentação em diferentes condições de concentração e tipo de sólido. Além disso, possibilitou conduzir os testes experimentais em diferentes proporções de medidas. O propósito da investigação foi avaliar, prever e quantificar a sedimentação dos adensantes através da técnica que utiliza os transmissores de pressão tornando-se possível avaliar a concentração de sólidos por meio da pressão ao longo do tempo.

3.1.1 Unidade Experimental de Bancada I e II

O monitoramento da concentração de sólidos no processo de sedimentação de materiais particulados em fluidos de perfuração foi estudado a partir de Unidades Experimentais de Bancada, conforme mostrado nas Figuras 3.1 e 3.2, desenvolvidas no Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani. A primeira unidade de sedimentação é composta por uma coluna cilíndrica de material acrílico, com 97,25 cm de altura e 7,42 cm de diâmetro. Esta coluna possui 14 saídas laterais, das quais 5 foram utilizadas para a inserção de transdutores de pressão em alturas distintas. Para o ponto de

leitura, quatro transmissores diferenciais de pressão foram utilizados e seus sensores foram inseridos em posições pré-determinadas em relação à base da coluna, a saber: 66 cm, 25 cm, 16 cm e 6 cm. Os canais de leitura foram denominados como CH1, CH2, CH3 e CH4, respectivamente, conforme ilustrado na representação esquemática abaixo.

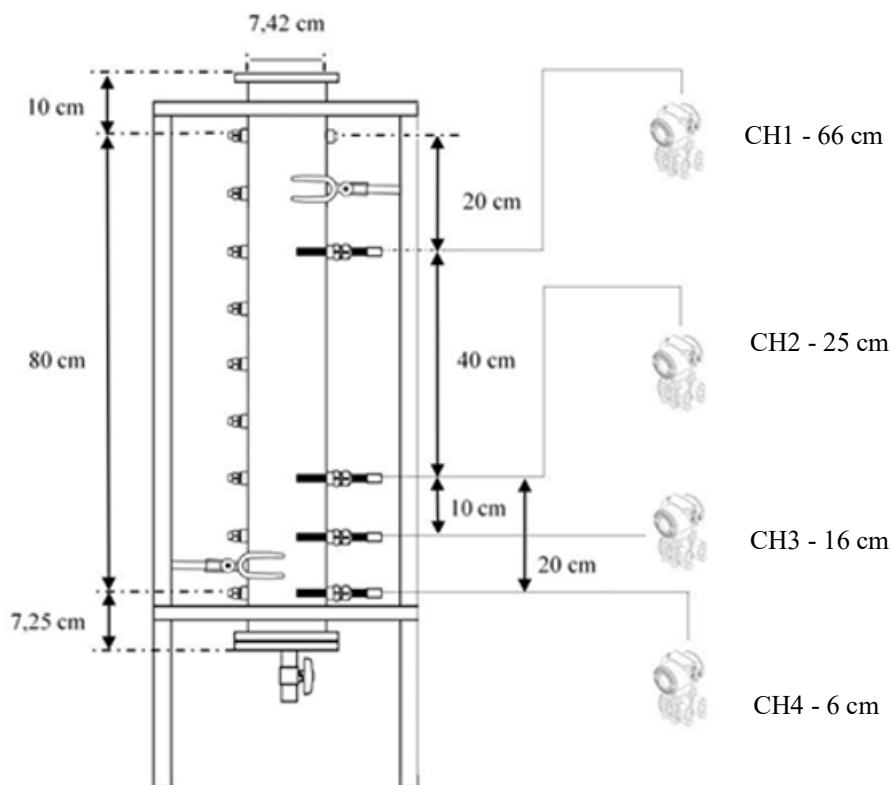


Figura 3.1 Representação Esquemática da Unidade I de Bancada de Monitoramento da Concentração de Sólidos com as respectivas alturas de cada ponto de medição da pressão. Fonte: AUTOR, 2023.

Uma segunda unidade também foi utilizada para estudar a sedimentação, a qual possui o mesmo *design* da primeira unidade de monitoramento da concentração de sólidos. Contudo, o referido aparato experimental apresenta uma escala maior, com altura de 1,60m e 7,24 de diâmetro, conforme mostrado na Figura 3.2. Assim como a apresentado anteriormente, a coluna acrílica possui saídas laterais para inserção de instrumentos de medição com a distância de 17 cm entre elas. Seu objetivo foi conduzir a investigação e controle da separação das fases na sedimentação do particulado e o monitoramento da cinética do processo.

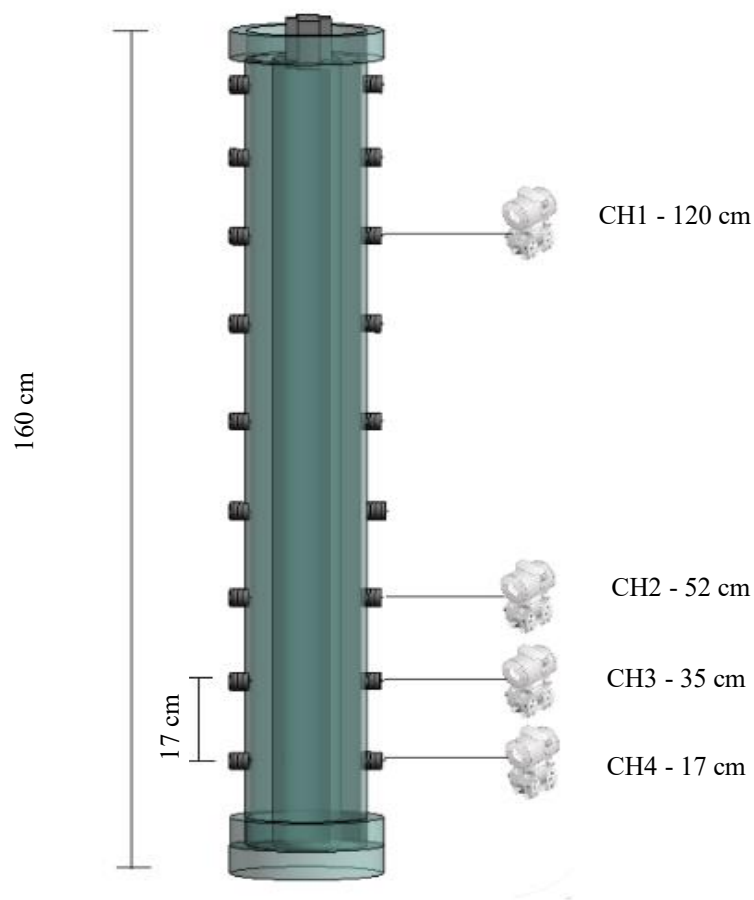


Figura 3.2 Representação Esquemática da Unidade II de Bancada de Monitoramento da Concentração de Sólidos. Fonte: AUTOR, 2023.

3.1.2 Unidade Piloto

O monitoramento da concentração de sólidos com auxílio de transdutores de pressão também foi avaliado em uma unidade piloto, desenvolvida no Laboratório de escoamento de Fluidos Giulio Massarani. A Unidade Piloto de Monitoramento da Concentração de Sólidos, conforme mostrado na Figura 3.3, é uma coluna modular de aço carbono, flangeada, com 4 m de altura e saídas laterais. Tendo como ponto de referência a base da coluna, o diâmetro externo do módulo 1 equivale a 2 1/5", com 1 m de comprimento. Já os outros dois módulos têm diâmetro externo de 3" e extensão de 1,5 m. Portanto, há uma transição de diâmetro do segundo para o terceiro módulo, análoga ao que ocorre em anulares com sapata aberta. Foi estruturada em módulos rosqueáveis

com a presença de flanges. Estes possibilitarão a mudança de configuração, com alternância de posição e módulo.

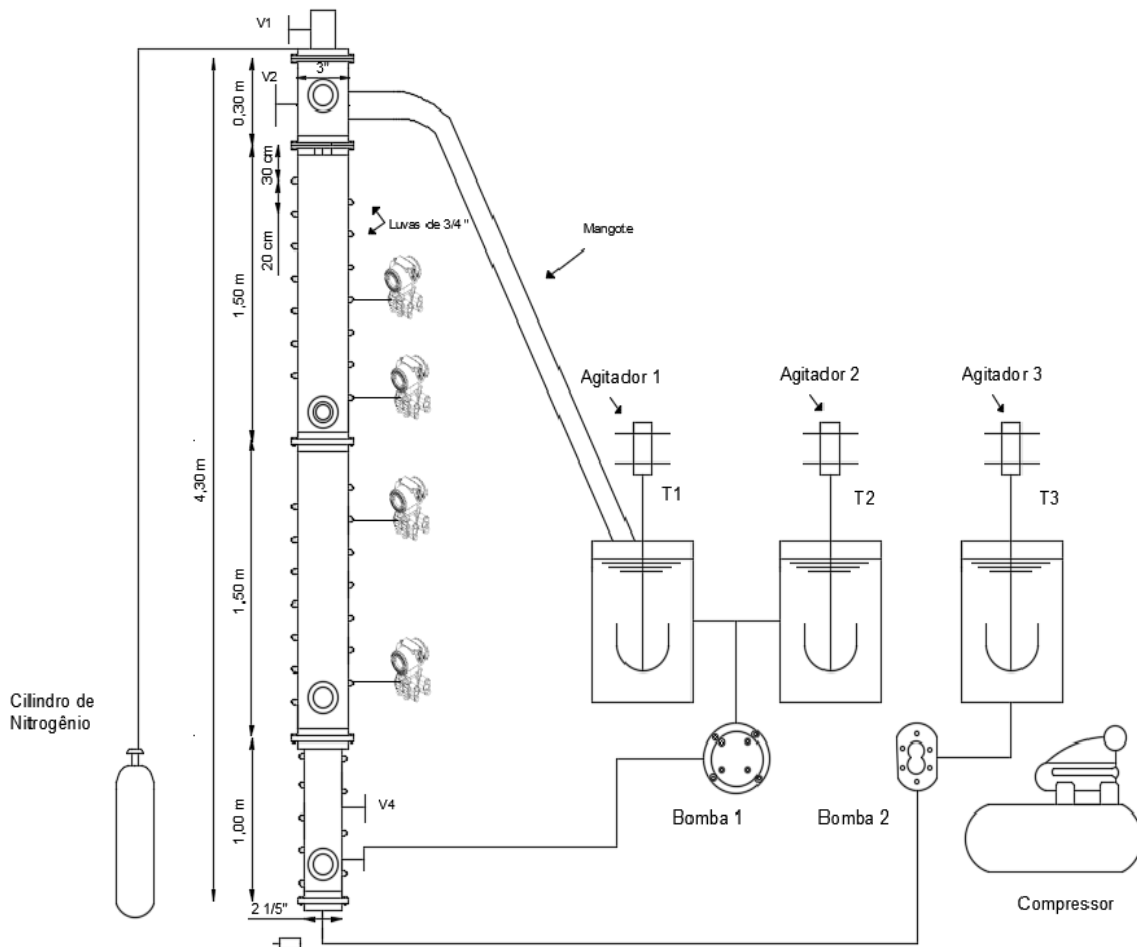


Figura 3.3 Representação esquemática da Unidade Piloto de Monitoramento da Concentração de Sólidos. Da base para o topo têm-se: transmissor 1 – CH1; transmissor 2- CH2; transmissor 3 – CH3; transmissor 4- CH4. Fonte: Autor, 2023.

Foram soldadas 38 luvas na área lateral dos módulos ao longo da coluna, sendo que 19 de cada lado, com diâmetro de $\frac{3}{4}$ " e espaçamento de 20 cm entre elas. A peça hidráulica foi incluída para que se possa inserir equipamentos de medição como os eletrodos, transmissores de pressão e os termopares para acompanhar a temperatura do fluido.

Tanques de polipropileno foram utilizados para armazenamento e mistura dos fluidos de perfuração. A homogeneização da suspensão se dá através de agitadores da marca WEG (modelo T.Q MIX 160) que alcançam a velocidade máxima de 1700 RPM. Bombas de deslocamento positivo helicoidal e centrífuga foram acopladas a estrutura para a manipulação do fluxo do fluido. A bomba de deslocamento positivo helicoidal de

5,5 hp, da empresa NETZSCH, é responsável pelo escoamento do fluido pela coluna de sedimentação por meio de mangotes de 2” conectando a uma válvula on/off (da empresa BONOMI BRASIL). A bomba centrífuga da empresa EDRAL de modelo ED1X42, promove a circulação do fluido de aquecimento para dentro da tubulação caso este seja utilizado.

Inversores de frequências de modelo CFW 300 da empresa WEG, foram acoplados a um painel e são responsáveis pelo controle da rotação da bomba e agitadores. Assim torna-se possível o manuseio de velocidades com intuito de aumentar, diminuir ou interromper o escoamento de fluidos, Figura 3.4.



Figura 3.4 Painel de controle com inversores de frequência. Fonte: AUTOR, 2023.

A Unidade Piloto, Figura 3.5, tem a capacidade de operar em diferentes cenários de pressão pois pode ser pressurizada. Podem também ser utilizados diferentes ângulos de inclinação para avaliar a sedimentação. Caso seja de interesse, pode-se acoplar um tubo interno para avaliar a sedimentação em região anular e ainda pode-se circular fluido aquecido neste tubo para simular a etapa de produção de petróleo. Neste trabalho, por ser o primeiro realizado na coluna, a unidade foi simplificada adotando-se o posicionamento vertical, sem tubo interno e sedimentação a pressão atmosférica. O aparato experimental

apresenta vantagens relevantes para pesquisas na área de sedimentação. A sua versatilidade permite análises com fluidos sobrepostos, diferentes temperaturas, sedimentação bidimensional com degrau. Desta forma têm-se uma ampliação significativa de possibilidades para estudos experimentais na sedimentação de fluidos de perfuração.



Figura 3.5 Unidade Piloto de Monitoramento da Concentração de Sólidos. Fonte: AUTOR, 2023.

3.2 Técnica de Pressão Hidrostática

A técnica de investigação utilizada para monitorar o perfil de concentração de sólidos neste trabalho foi a de pressão hidrostática. Para os estudos nas unidades de bancada utilizou-se transdutores de pressão diferenciais e para a unidade piloto os manométricos.

Nas unidades de bancada o sensor de medida do transdutor era inserido a uma certa altura de modo a se obter zero milibar. A pressão de referência é a atmosférica o que

possibilitou a leitura da pressão exercida pela coluna de fluido acima do ponto lido. Já para a Unidade Piloto de Monitoramento da Concentração de Sólidos foram utilizados quatro transmissores manométricos. E para todas as unidades utilizou-se transmissores da marca da SMAR de modelo LD301.

Os sensores do transdutor de pressão, Figura 3.3, entram em contato com o fluido para realizar medidas de pressão. Desta forma, a pressão exercida pelo fluido, deforma ou leva a variações da capacitância quando em contato com o diafragma. Essa variação está relacionada a deformação física do sensor de pressão. Então, é usada para alterar a frequência de um oscilador, que acaba por fornecer a pressão exercida sobre o sensor. O valor de pressão lido pode ser então utilizado para determinar concentração volumétrica média de partículas acima do ponto de leitura.

A Figura 3.6 ilustra o transmissor de pressão adquirido para a pesquisa.



Figura 3.6 Transmissor de pressão utilizado em estudos de sedimentação. Fonte: SMAR.

O esquema abaixo, Figura 3.7, mostra como funciona o transmissor de pressão LD301. Tem-se uma célula a qual no seu centro está localizado o diafragma sensor (1), que é projetado para flexionar em função das diferenças de pressão. Essas pressões são direcionadas diretamente aos diafragmas isoladores (2), que protegem o sensor e fornecem alta resistência a corrosão. A pressão é transmitida ao diafragma sensor por meio do fluido enchimento (3), que preenche o espaço entre os diafragmas isoladores e sensor, causando sua deflexão. O diafragma sensor é um eletrodo móvel e possui duas superfícies metalizadas (4), que são eletrodos fixos. A alteração na posição do diafragma leva a mudanças na capacitância entre os eletrodos fixos e móveis, permitindo a detecção

da deflexão do diafragma sensor. O oscilador ressonante detecta a variação das capacitâncias entre as placas moveis e fixas, gerando uma saída de pressão.

Os transmissores manométricos e diferenciais de pressão emitem um sinal elétrico de corrente de 4 A 20 mA que é enviado a uma placa de coleta de dados que realiza a conversão da leitura de corrente em pressão. Os dados de pressão são demandados em uma placa de aquisição de dados e posteriormente enviado a um computador, onde tem um *software* que recebe esses dados.

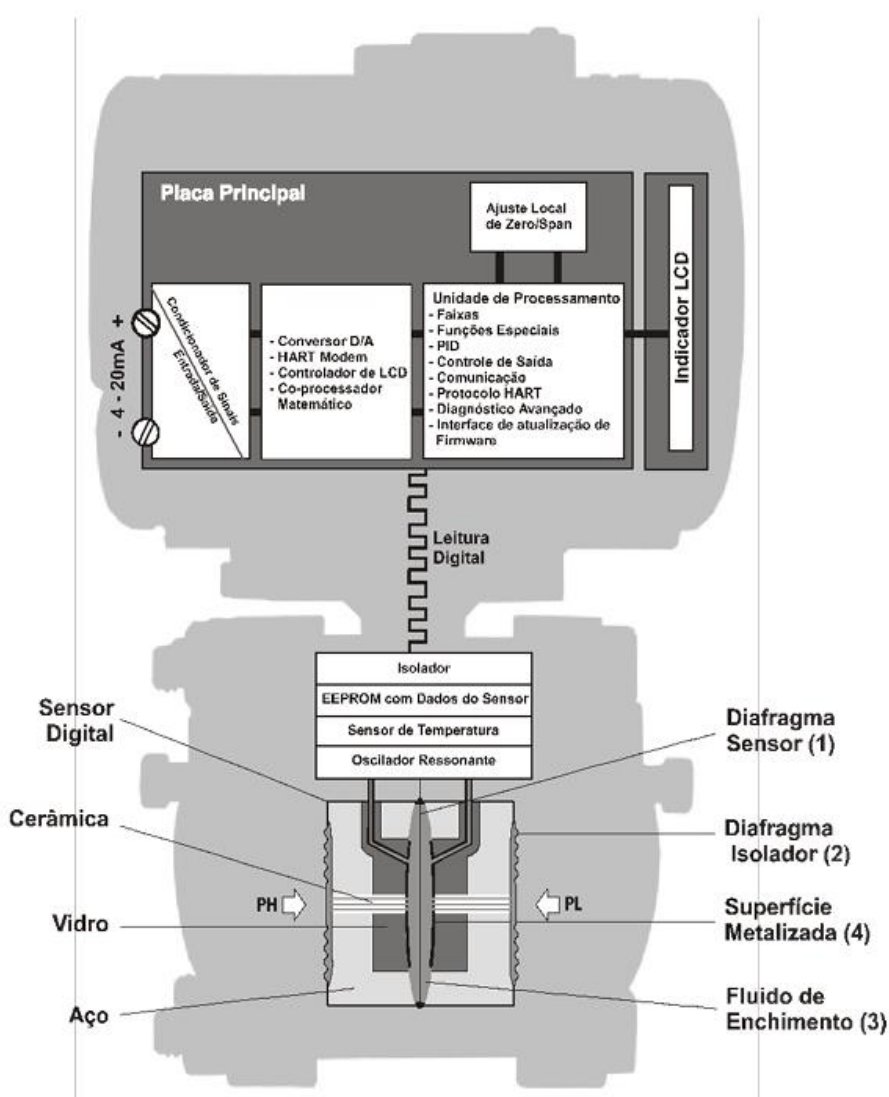


Figura 3.7 Representação esquemática do funcionamento do transmissor de pressão da SMAR e modelo LD301. Fonte: SMAR, 2022.

O *software* em linguagem gráfica LabView, aquisita os dados de pressão e os trata gerando dados de pressão pelo tempo conforme mostrado na Figura 3.8. A interface do

programa desenvolvido é composta por recurso de salvamento contínuo que permite aos usuários salvarem dados de pressão. Além do mais é possível visualizar de forma gráfica as curvas de pressão em cada posição a qual se encontram os transdutores. Em cada canal CH1, CH2, CH3 e CH4, é permitido então visualizar cada medida de hidrostática.

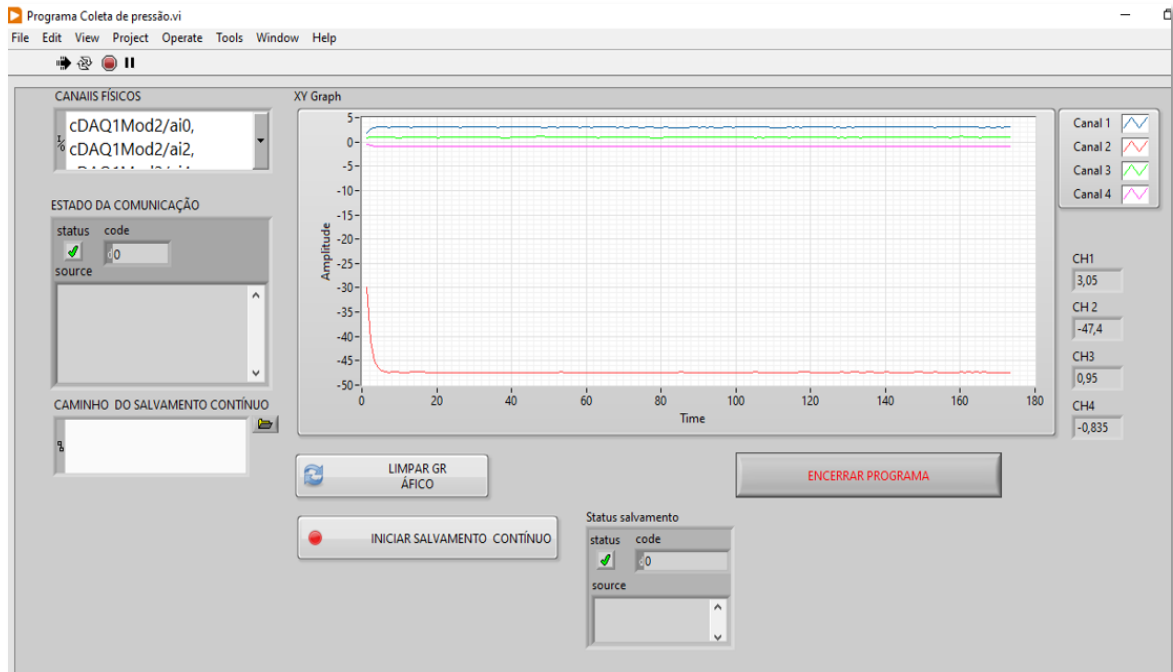


Figura 3.8 Interface do Software de aquisição de dados. Fonte: AUTOR, 2022.

Baseado na leitura de dados de pressão diferencial em cada transmissor calcula-se a massa específica da suspensão ρ_{susp} , Equação 3.1. O diferencial de pressão é caracterizado por ΔP , g é a aceleração da gravidade e z é a coluna de fluido acima do transdutor i analisado.

$$\rho_{susp_i} = \frac{\Delta P_i}{gz_i} \quad (3.1)$$

Com a massa específica calculada torna-se possível obter a concentração média dos sólidos (ε_s) na coluna de fluido acima do sensor transmissor, através da Equação 3.2. A concentração média dos sólidos equacionada traz a relação de massa específica da partícula sólida (ρ_s) e do fluido sem adensante (ρ_l).

$$\varepsilon_s = \frac{\rho_{susp_i} - \rho_l}{\rho_s - \rho_l} \quad (3.2)$$

A técnica de medição de pressão apresenta vantagens significativas, por ter um custo mais acessível, permite o estudo do comportamento de materiais e fluidos em diferentes condições de pressão. Além do mais, a aplicação é viável em fluidos opacos, incluindo os com adição de sal, além de ser de fácil implementação. Sendo assim, as técnicas tornam-se essenciais para uma ampla gama de estudos técnicos e científicos, contribuindo para o desenvolvimento de metodologias eficientes, principalmente no âmbito da sedimentação de materiais particulados.

3.3 Monitoramento Visual da Interface de Sedimentação

Para validação do método investigado na Unidade de Bancada por diferencial de pressão, foi realizado o acompanhamento da visualização da dinâmica da interface superior do ensaio de sedimentação. Isso tornou-se viável de maneira que o fluido em estudo não era opaco, apenas água e adensante. Foi acoplado junto ao cilindro acrílico uma fita métrica para realizar a medição de comprimento. Medidas de altura foram coletadas ao longo de intervalos de tempo pré-determinados, entre 15 segundos até 20 minutos. Aferiu-se a altura da interface em cada instante de maneira visual e realizou a triplicata para avaliar o erro experimental.

3.4 Caracterização do Material Particulado e da Suspensão

Os materiais adensantes utilizados para adensar o fluido foram o Sulfato de Bário (Barita) e o Carbonato de Cálcio (Calcita). A caracterização dos materiais adensantes se dá por medições de massa específica, distribuição granulométrica, avaliação do comportamento reológico e densidade do fluido.

3.4.1 Massa Específica da Partícula Sólida

A determinação da massa específica da barita e da calcita foi realizada por meio da técnica de picnometria, em triplicata, utilizando um picnômetro como o apresentado na Figura 3.9.



Figura 3.9 Picnômetro em material de vidro utilizado na técnica de Picnometria.

O cálculo da densidade do material particulado pode ser feito com o auxílio da equação 3.3, (PEÇANHA, 2014):

$$\rho_s = \frac{m_{ps} - m_p}{m_{pl} - m_p - m_{pls} + m_{ps}} \rho_{ref} \quad (3.3)$$

onde m_p e m_{ps} é representado pela massa (g) do picnômetro vazio e com sólido, m_{pl} massa em gramas (g) do picnômetro com o líquido de referência, m_{pls} é a massa (g) da suspensão (sólido e líquido), ρ_{ref} (g/cm³) é a densidade do líquido de referência que para a pesquisa atual foi a da água e ρ a densidade do sólido que é expressa em g/cm³.

3.4.2 Distribuição Granulométrica

A distribuição do tamanho das partículas foi determinada pelo equipamento Malvern Mastersizer 2000, Figura 3.10, que fornece a curva granulométrica através da técnica de difração a laser.

A técnica se baseia nas variações de feixe de luz que atravessa a amostra e a luz dispersa é medida em várias angulações. Partículas com diâmetros grandes dispersam a luz sob pequenos ângulos, e as menores desviam os raios em ângulos maiores. A partir da dispersão angular os dados são analisados para calcular o tamanho das partículas, fundamentado na teoria de difusão da luz de Mie (MALVERN, 2003).



Figura 3.10 Analisador de Partículas Malvern Mastersizer 2000. Fonte: AUTOR, 2023.

Para a técnica de difração a laser a primeira parte é a limpeza com água destilada do equipamento por um período de 20 minutos e posteriormente lava-se a célula com água destilada. Feito o procedimento adiciona-se o material particulado em um béquer com o volume de 1000 ml de dispersante. A água foi escolhida como dispersante devido à baixa solubilidade da barita e da calcita neste meio. A adição da amostra ocorre em meio de agitação e aplicação de ondas ultrassônicas. Os resultados do teste fornecem a curva granulométrica e o diâmetro de diferentes partículas como uma função da fração volumétrica.

3.4.3 Técnica de Gravimetria para Determinar a Concentração

Para os testes realizados na unidade piloto foram retiradas alíquotas de fluido em alguns pontos na coluna e no tanque de agitação para avaliar se a suspensão se encontrava homogênea. Para a análise da concentração local utilizou a técnica de gravimetria, que é um método analítico que são utilizadas medições de massas para determinar a quantidade de um analito da amostra. Pela Equação 3.4 é calculada a concentração local de sólidos.

$$\bar{\varepsilon}_s = \frac{\frac{m_{úmida}}{m_{seca}} - 1}{\frac{m_{úmida}}{m_{seca}} - 1 + \frac{\bar{\rho}_f}{\rho_s}} \quad (3.4)$$

onde $\bar{\epsilon}_s$ representa a concentração local de sólidos (adimensional), $m_{úmida}$ (g) massa úmida do material, m_{seca} é a massa do material seco (g), $\bar{\rho}_f$ massa específica da fase líquida e ρ_s massa específica do material sólido.

3.5 Reologia dos Fluidos

O reômetro ANTON PAAR modelo MCR 302, Figura 3.11, foi utilizado para o levantamento da reologia dos fluidos estudados. O equipamento mede as propriedades reológicas por meio de uma ampla gama de funcionalidade e configurações, que inclui diversos testes reológicos, tais como rampa de tensão, teste de *creep-recovery*, curva de fluxo, varredura de amplitude e entre outros. As propriedades de fluxo de deformação dos fluidos são determinadas no equipamento, que possui um conjunto de geometrias especializadas para diferentes medições. Além disso, o reômetro permite controlar e medir a temperatura durante os testes. O equipamento é capaz de controlar a velocidade de rotação ou a taxa de deformação aplicada ao material em estudo. Sua tecnologia avançada permite caracterizar e entender o comportamento reológico do fluido. Em termos de medição, foi utilizado a geometria *double-gap* (DG), que possibilitou realizar os testes de curva de fluxo. A geometria em contexto, tem uma alta precisão de torque, especialmente em líquidos de baixa viscosidade.



Figura 3.11 Reômetro da Anton Paar utilizado para estudos reológicos. Fonte: AUTOR, 2024.

3.6 Planejamento Experimental

As suspensões aquosas estudadas foram analisadas em variadas concentrações volumétricas de Barita e Calcita, 10%, 15% e 20%. O Sulfato de Bário utilizado foi o 810/100, fabricado pela empresa Brasil Minas e aditivado ao fluido da pesquisa. Ainda foi utilizado o Carbonato de Calcio médio como objeto de estudos para os testes de análise da sedimentação. O propósito da investigação foi avaliar, prever e quantificar a sedimentação da barita e do carbonato de cálcio através da técnica que utiliza os transmissores de pressão. Os testes foram conduzidos nas três unidades: duas de Bancada e uma Piloto. O fluxograma mostrado na Figura 3.12 que detalha as etapas do planejamento experimental, incluindo as atividades executadas em cada unidade, os adensantes utilizados e a identificação dos fluidos. Para a validação da técnica por transmissores de pressão, foram realizados diversos conjuntos de testes de sedimentação. A base de todas as suspensões foi água. Para a Unidade I de Bancada foram realizados testes com concentração volumétrica de partículas sólidas de Barita e a Calcita em, 10 %, e 20 %, ver Tabela 3 e 4. Para a Unidade II de Bancada foram realizados testes em concentrações volumétrica de Barita e Calcita a 10% (em triplicata), 10% e 15%, Tabela 5 e 6. Já na Unidade Piloto os testes foram divididos em validação com água e concentrações de 10%, conforme apresentado na tabela 7.

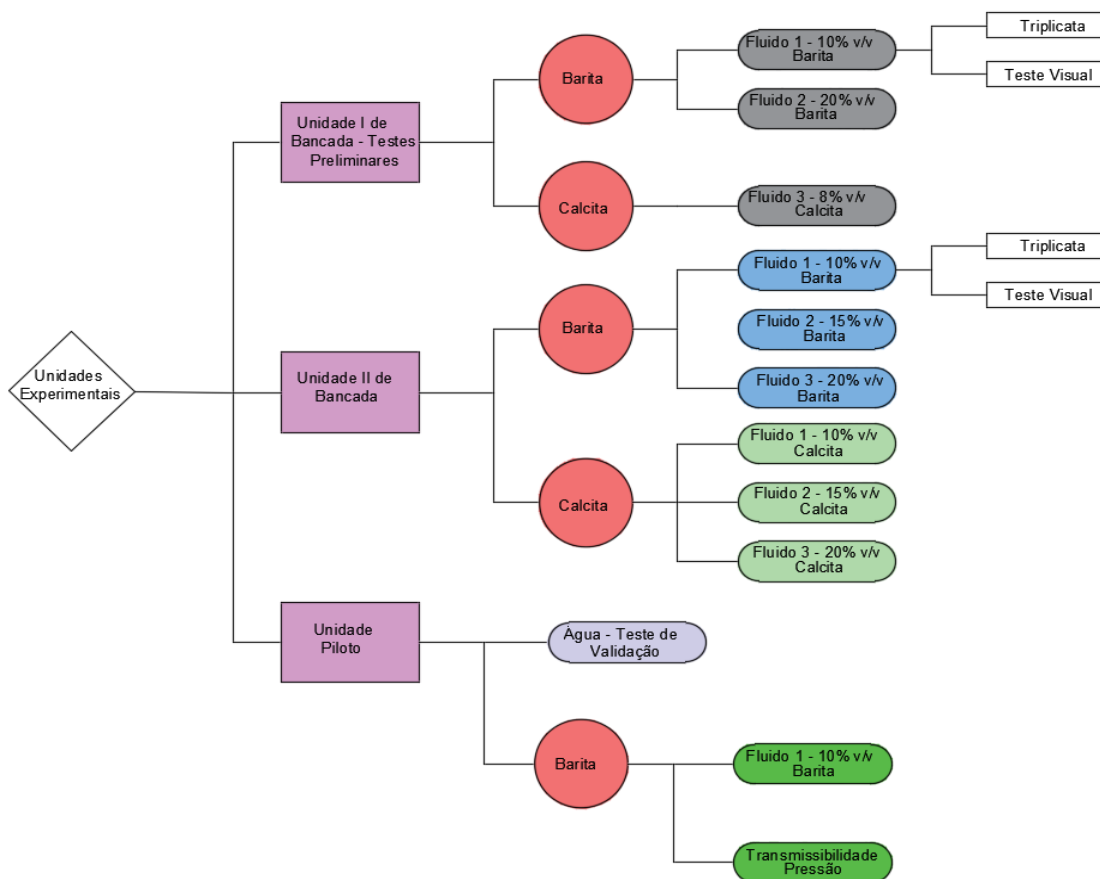


Figura 3.12 Fluxograma do planejamento experimental com os testes com Calcita e Barita nas unidades experimentais. Fonte: AUTOR, 2024.

Tabela 3 Dados da suspensão de Barita em água para os testes preliminares na Unidade I de Bancada, Fluido 1 e 2. Fonte: AUTOR, 2023.

Fluido 1 e 2 – Unidade I de Bancada (Barita)			
Material Adensante	Fluido	Concentração Volumétrica v/v	Testes
Barita	1	10%	3
	2	20%	3

Tabela 4 Dados da suspensão de Carbonato de Cálcio em água para os experimentos na Unidade I de Bancada, Fluido 3. Fonte: AUTOR, 2023.

Fluido 3 – Unidade I de Bancada (Carbonato de Cálcio)		
Água Destilada	94%	v/v
Goma Xantana	11,97	G
Glutaraldeído	2,226	mL
Antiespumante	35,182	mL
Carbonato de Cálcio Médio	665,05	G

Tabela 5 Dados da suspensão de barita em água para os experimentos na Unidade II de Bancada, Fluido 1, 2 e 3. Fonte: Autor, 2023.

Fluido 1,2 e 3 - Unidade II de Bancada (Barita)			
Material Adensante	Fluido	Concentração Volumétrica v/v	Testes
Barita	1	10%	3
	2	15%	1
	3	20%	1

Tabela 6 Dados da suspensão de calcita em água para os experimentos na Unidade II de Bancada, Fluido 1, 2 e 3. Fonte: AUTOR, 2023.

Fluido 1,2 e 3 - Unidade II de Bancada (Calcita)			
Material Adensante	Fluido	Concentração Volumétrica v/v	Testes
Calcita	1	10%	3
	2	15%	1
	3	20%	1

Tabela 7 Dados da suspensão de concentração volumétrica de barita para a Unidade Piloto – Fluido 1.

Fluido 1		
Material Adensante	Concentração Volumétrica v/v	Testes
Barita	10%	1

O preparo do fluido da Unidade de Bancada foi realizado manualmente inserindo os materiais a um recipiente e homogeneizando-os por meio de agitadores. Após 30 minutos, os agitadores são desligados e o fluido é imediatamente vertido na coluna de acrílico. Esses instantes de tempo ocorrem para garantir que o fluido esteja homogeneizado e não sedimente no fundo do recipiente.

Já na Unidade Piloto, o preparo do fluido foi realizado nos tanques, inserido o material de maneira manual e com o auxílio dos agitadores o fluido foi homogeneizado. Após 30 minutos de agitação, com o auxílio de uma bomba de deslocamento positivo helicoidal, o fluido era circulado pela coluna de sedimentação. Para o confinamento da suspensão, após um tempo de 1 hora de agitação e circulação, o agitador e a bomba foram desligados. A válvula de acionamento automático (ON/OFF) na base da coluna (V4) é

fechada, assim como a válvula (V2) próxima ao topo que é responsável pelo fluxo de fluido no mangote, enquanto a válvula (V1) no topo fica aberta para atmosfera, e posteriormente o fluido é confinado na coluna. Assim adota-se esse manuseio com as válvulas uma padronização para o confinamento do fluido no sistema. Para garantir a homogeneização, alíquotas foram coletadas do tanque e em pontos onde se encontram as válvulas de escoamento, possibilitando a realização da concentração local do fluido por meio da técnica de gravimetria. Dessa forma, foi possível identificar se o fluido está homogeneizado ou não pela coluna de sedimentação.

3.6.1 Avaliação Preliminar da Transmissibilidade de Pressão

O sedimento formado no fundo do anular sofre compressão ao longo do processo e pode ou não transmitir pressão, dependendo se é um meio poroso permeável ou impermeável. De acordo com Rocha (2009), a transmissão de pressão depende da altura da coluna de fluido, da densidade dos hidrocarbonetos e da pressão do fluido da formação na base da coluna. É importante avaliar se a estrutura formada é capaz ou não de transmitir pressão entre o fluido e a rocha, influenciando no comportamento do sedimento e a falha na mitigação do *APB*. Para avaliar a transmissibilidade de pressão do sedimento, foram realizados testes de pressurização com nitrogênio na Unidade Piloto. O balão de nitrogênio foi posicionado no topo da coluna de sedimentação e acionado, observando-se ao longo do tempo se houve variação na pressão ou não.

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resumo: no presente capítulo são apresentados e discutidos principais resultados experimentais obtidos. A divisão do capítulo é dada pela caracterização do sistema particulado, ensaios de sedimentação nas unidades de bancada I e II e na unidade piloto de monitoramento dos sólidos, finalizando com experimentos de transmissibilidade de pressão.

4.1 Caracterização do Sistema Particulado

Foram realizados diferentes teste de sedimentação nas três unidades anteriormente descritas. Como os lotes de material particulado sofreram alterações de acordo com o fabricante e o da época de aquisição, optou-se por fazer a caracterização dos sistemas particulados separadamente para cada teste. A caracterização do tamanho das partículas é importante para a compreensão abrangente do comportamento do sólido presente no fluido base água em estudo. A seguir são apresentados os resultados obtidos.

4.1.1 Unidade de Bancada I: Testes Preliminares

4.1.1 Suspensão Barita 10%

A análise granulométrica do material particulado foi realizada utilizando o Malvern Mastersizer 2000, equipamento específico para esse fim. A partir dele, obteve-se os dados da distribuição granulométrica das partículas e o cálculo do diâmetro médio. Os resultados são mostrados na Figura 4.1 e na Tabela 4.1. A densidade da barita verificada por intermédio do picnômetro foi de $3,80 \pm 0,0006 \text{ g/cm}^3$ e a densidade do fluido de $1,22 \pm 0,006$.

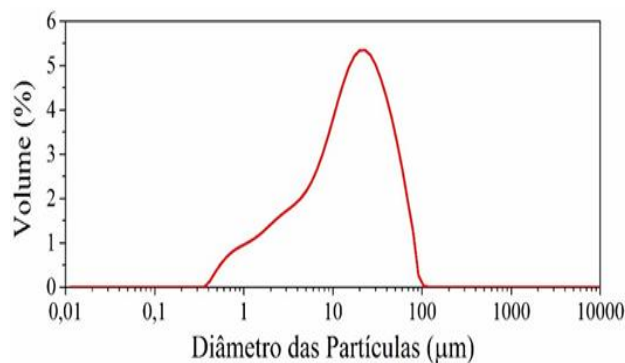


Figura 4.1 Distribuição do tamanho das partículas da barita utilizada nos experimentos em bancada I para os testes preliminares. Fonte: AUTOR, 2022.

Tabela 8 Dados dos diâmetros das partículas da barita usado nos testes preliminares de sedimentação. Fonte: Autor, 2022.

Sólido	Diâmetro Médio (μm)			
	d(0,1)	d(0,5)	d(0,9)	d[3,2]
Barita	1,88	14,44	44,61	4,99

Os dados apresentados na tabela acima, tem-se d(0,1), d(0,5), d(0,9), respectivamente, correspondendo aos diâmetros das partículas em 10%, 50% e 90% na distribuição granulométrica. Além disso, o d[3,2] é representado pelo diâmetro médio de Sauter. Pode-se observar uma distribuição monomodal com partícula entre 1 e 100 μm aproximadamente e diâmetro médio de sauter de 4,99 μm .

4.1.1.2 Suspensão Barita 20%

A figura 4.2 apresenta a distribuição granulométrica da barita utilizada no teste preliminar com 20% v/v de barita. A densidade do material foi de $3,149 \pm 0,0004 \text{ g/cm}^3$ e da suspensão de $1,27 \pm 0,007$.

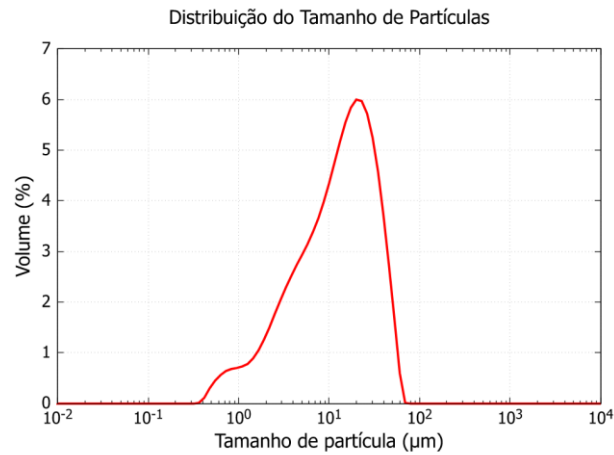
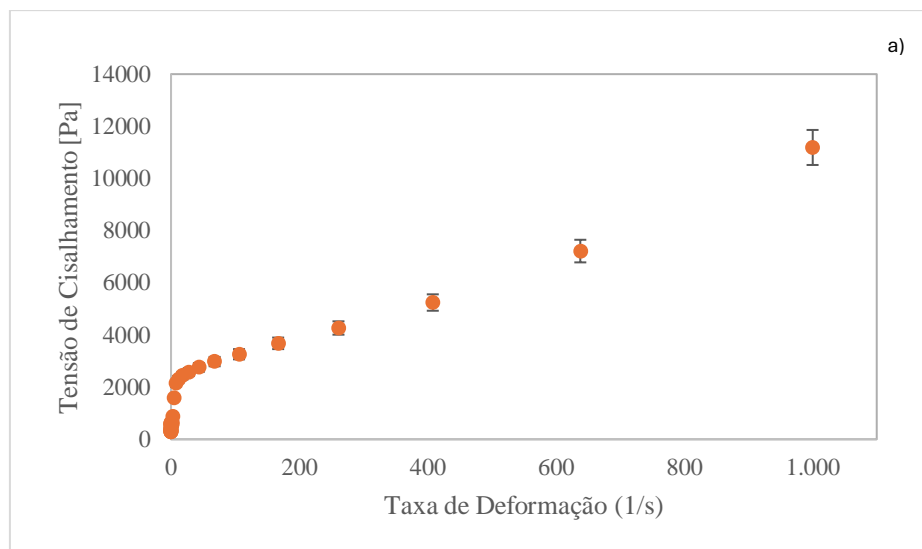


Figura 4.2 Distribuição do tamanho das partículas da barita utilizada nos experimentos realizados na Unidade de Bancada I, para concentração de 20% de barita utilizado nos testes preliminares. Fonte: Autor, 2023.

Para este caso, também foi realizado o estudo reológico com a curva de fluxo conforme mostrado na Figura 4.3, em triplicata. Os testes experimentais realizados a 25 °C, mostram uma relação não linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, característico de fluido não-newtoniano. Então, à medida que a tensão cisalhante aumenta, ocorre um decréscimo na viscosidade aparente da suspensão, mostrando ser um fluido do tipo pseudoplástico. O comportamento se apresenta oposto ao fluido dilatante, onde a viscosidade aparente aumenta à medida que imputa a taxa de deformação.



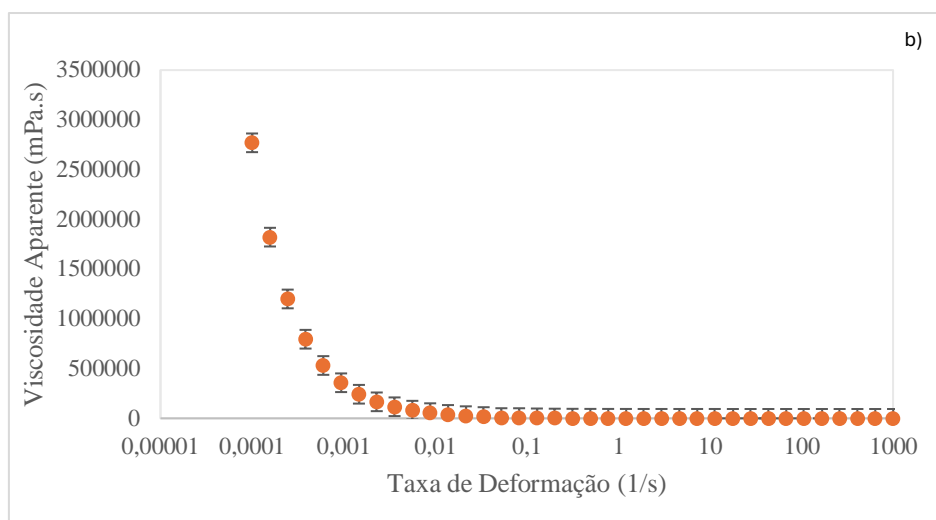


Figura 4.3 Curva de fluxo para a suspensão de água e barita com concentração de 20% (% v/v): a) Dados de tensão de cisalhamento por taxa de deformação; b) Dados de viscosidade por taxa de deformação. Taxa de deformação entre 0,0001 e 1000. Fonte: AUTOR, 2023.

As baritas apresentaram granulometrias diferentes, o que interferem na dinâmica de sedimentação da partícula sólida em suspensões. Partículas maiores possuem a tendência a sedimentar mais rapidamente do que as menores. Assim, as baritas de distintas granulometrias irão influenciar na velocidade de sedimentação.

4.1.1.3 Suspensão Calcita

Neste caso o fluido foi formulado de acordo com especificações do CENPES/Petrobrás utilizando calcita no tamanho médio 2-44 μm , em concentração de 7% v/v, e goma xantana como viscosificante. A formulação completa é apresentada na tabela 4.2 do capítulo materiais e métodos. A distribuição do tamanho das partículas (Figura 4.4) com densidade da calcita de $2,56 \pm 0,0043$ a da suspensão ficou em $1,10 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 9 Dados dos diâmetros das partículas da calcita usado nos testes preliminares de sedimentação. Fonte: AUTOR, 2023.

Material Sólido	Diâmetro Médio (μm)			
	d(0,1)	d(0,5)	d(0,9)	d[3,2]
Barita	$6,17 \pm 0,32$	$54,39 \pm 4,34$	$197,78 \pm 8,27$	$11,34 \pm 0,34$

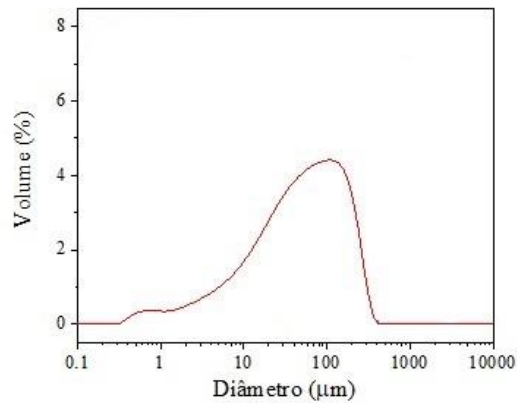


Figura 4.4 Distribuição do tamanho das partículas do carbonato de cálcio médio utilizada nos experimentos realizados na Unidade de Bancada I, para concentração volumétrica de 7% nos testes preliminares.

A reologia do fluido é apresentada na Figura 4.5-a e Figura 4.5-b, onde a representação da sugere que o fluido exibe um comportamento não-newtoniano, especificamente do tipo pseudoplástico. Os fluidos não-newtonianos geralmente apresentam curvas não lineares, indicando que a taxa de deformação não é diretamente proporcional à tensão de cisalhamento. Este fluido em particular contém goma xantana, que tem como objetivo aprimorar as propriedades reológicas durante a perfuração de poços de petróleo. A goma xantana (GX) é um polímero solúvel em água amplamente utilizado como viscosificante no processo de perfuração, destacando-se pelo seu baixo custo e pela sua versatilidade em diversas aplicações (SANTANA, 2014)

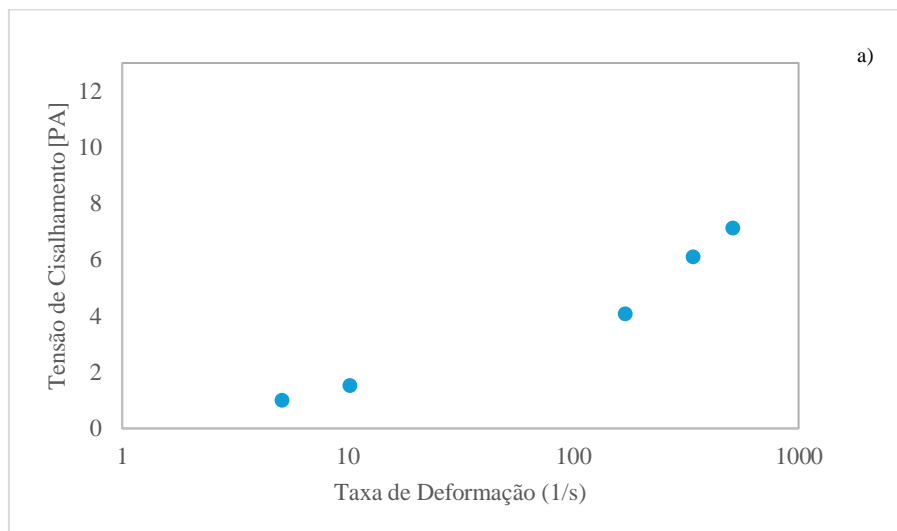




Figura 4.5 Curva de fluxo para a suspensão do fluido complexo com concentração volumétrica com 7% de calcita com presença de goma xantana: a) Dados de tensão de cisalhamento por taxa de deformação; b) Dados de viscosidade por taxa de deformação. Taxa de deformação entre 0,0001 e 1000. Fonte: Autor, 2024.

4.1.2 Unidade de Bancada II

4.1.2.1 Suspensão de Barita Concentração 10%, 15% e 20%

A análise granulométrica fornece informações cruciais para interpretação dos resultados experimentais, em especial para os testes conduzidos na Unidade de Bancada II, no qual foi utilizada barita com massa específica de $3,47 \pm 0,0014 \text{ g/cm}^3$. Os resultados da curva granulométrica podem ser encontrados na Figura 4.6, enquanto os dados de diâmetro das partículas estão detalhados na Tabela 4.3. Já a densidade dos fluidos preparados é mostrada na Tabela 4.4. A curva granulométrica se apresenta monodal com diâmetro médio de sauter de $8,65 \mu\text{m}$.

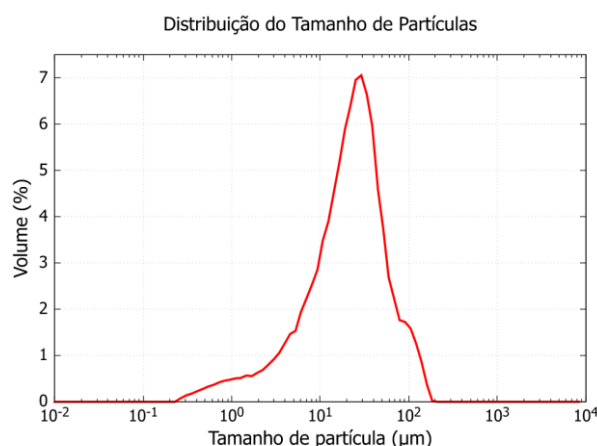


Figura 4.6 Distribuição do tamanho das partículas da barita utilizada nos experimentos em bancada II, a concentrações volumétricas de 10%, 15% e 20%. Fonte: AUTOR, 2024.

Tabela 10 Diâmetros da barita utilizada nos testes de sedimentação na Unidade de Bancada II. Fonte: AUTOR, 2024.

Material Sólido	Diâmetro Médio (μm)			
	d(0,1)	d(0,5)	d(0,9)	d[3,2]
Barita	4,42	24,00	66,70	8,65

Tabela 11 Dados de densidade do fluido para os testes na Unidade de Bancada II, de concentrações volumétricas de 10%, 15% e 20% de barita. Fonte: AUTOR, 2024.

Unidade de Bancada I		
Material Adensante	Concentração Volumétrica (%)	Densidade do Fluido (g/cm^3)
Barita	10	$1,24 \pm 0,011$
	15	$1,25 \pm 0,010$
	20	$1,27 \pm 0,005$

4.1.2.2 Suspensão Concentração Volumétrica de Calcita 10%, 15% e 20%

A análise granulométrica nos informam dados essenciais para entender como as partículas interagem e se comportam em diferentes condições experimentais. Para os testes com calcita a concentrações volumétricas de 10%, 15% e 20% realizados na Unidade de Bancada II (Figura 4.7), obteve massa específica de $2,56 \pm 0,0043$ e densidade do fluido apresentado na Tabela 4.5.

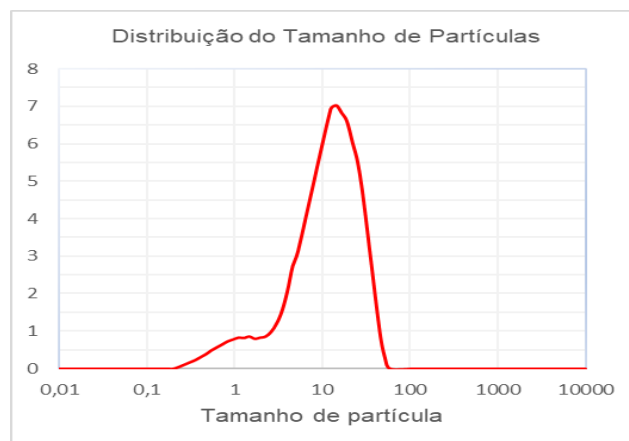


Figura 4.7 Distribuição do tamanho das partículas da calcita utilizada nos experimentos em bancada II, a concentrações volumétricas de 10%, 15% e 20%. Fonte: Autor, 2024.

Tabela 12 Diâmetros da barita utilizada nos testes de sedimentação na Unidade de Bancada II. Fonte: AUTOR, 2024.

Material Sólido	Diâmetro Médio (μm)			
	d(0,1)	d(0,5)	d(0,9)	d[3,2]
Barita	2,79	12,5	30,4	8,65

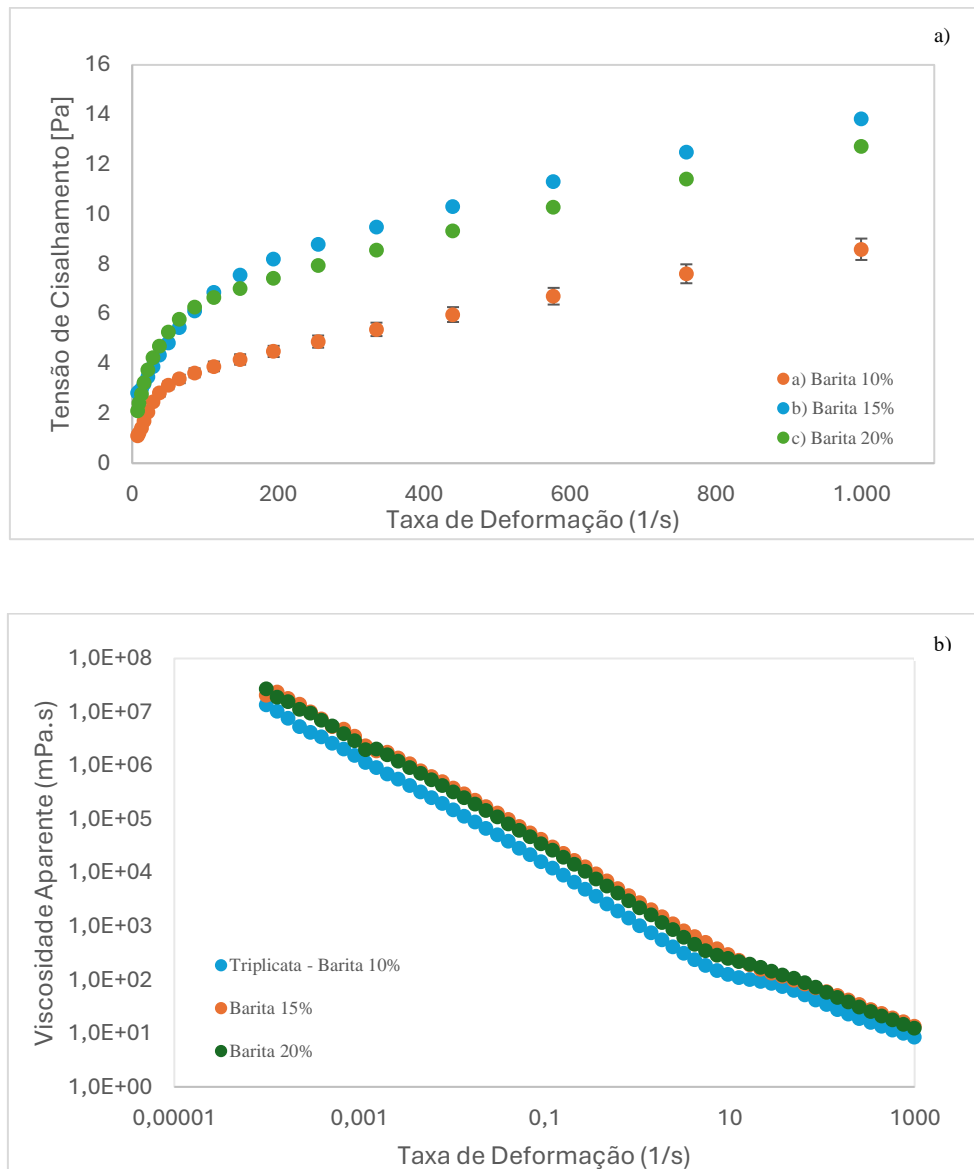
Tabela 13 Dados de densidade do fluido para os testes na Unidade de Bancada II, de concentrações volumétricas de 10%, 15% e 20% de calcita. Fonte: AUTOR, 2024.

Unidade de Bancada I		
Material Adensante	Concentração Volumétrica (%)	Densidade do Fluido (g/cm^3)
Barita	10	$1,10 \pm 0,05$
	15	$1,20 \pm 0,11$
	20	$1,10 \pm 0,05$

4.1.2.3 Estudo Reológico para as Concentrações Volumétricas de Barita de 10%, 15% e 20%

Para os estudos reológico do fluido foram realizadas comparações para as concentrações volumétricas de 10%, 15% e 20% (Figura 4.8 -a e 4.8 - b), com intuito de entender o seu comportamento. Foi observado que à medida que, a tensão de cisalhamento aumenta, o fluido adquire uma característica não newtoniana, revelando ser pseudoplástico, esse comportamento foi consistente para as três concentrações volumétricas. Por ser pseudoplástico, a viscosidade aparente do fluido depende da tensão de cisalhamento. E quando ocorre a diminuição da viscosidade a tensão aumenta (DINIZ,

2009). Pode-se observar que a concentração de sólidos afeta a reologia do fluido, sendo que quanto maior a concentração mais não newtoniano é o fluido.



4.8 Dados de comparação de curva de fluxo para partículas da barita utilizada nos experimentos em bancada II, a concentrações de 10%, 15% e 20%: a) Dados de tensão de cisalhamento por taxa de deformação; b) Dados de viscosidade por taxa de deformação. Fonte: AUTOR, 2024.

4.1.2.4 Estudo Reológico para as Concentrações Volumétricas de Calcita de 10%, 15% e 20%

Na Figura 4.9-a e Figura 4.9-b são apresentadas comparações entre as curvas de fluxo para o estudo reológico das suspensões de calcita. É possível notar que para as três curvas há um comportamento pseudoplástico, indicando que à medida que a taxa de cisalhamento aumenta, a viscosidade do fluido diminui. Torna-se claro que, à proporção

que a concentração volumétrica de sólidos aumenta, especialmente com 20% de calcita, a curva torna-se mais não linear, principalmente em baixas taxas de cisalhamento. Mostrando que a relação entre a viscosidade e a taxa de cisalhamento não é mais diretamente proporcional, como acontece em um fluido newtoniano. No entanto, em taxas mais elevadas, essa inclinação diminui. Isso indica que quanto maior a concentração de sólidos, maior a propensão do fluido a ser pseudoplástico. Portanto, nota-se que a presença de mais partículas sólidas na suspensão aumenta a tendência do fluido de se tornar menos viscoso sob cisalhamento.

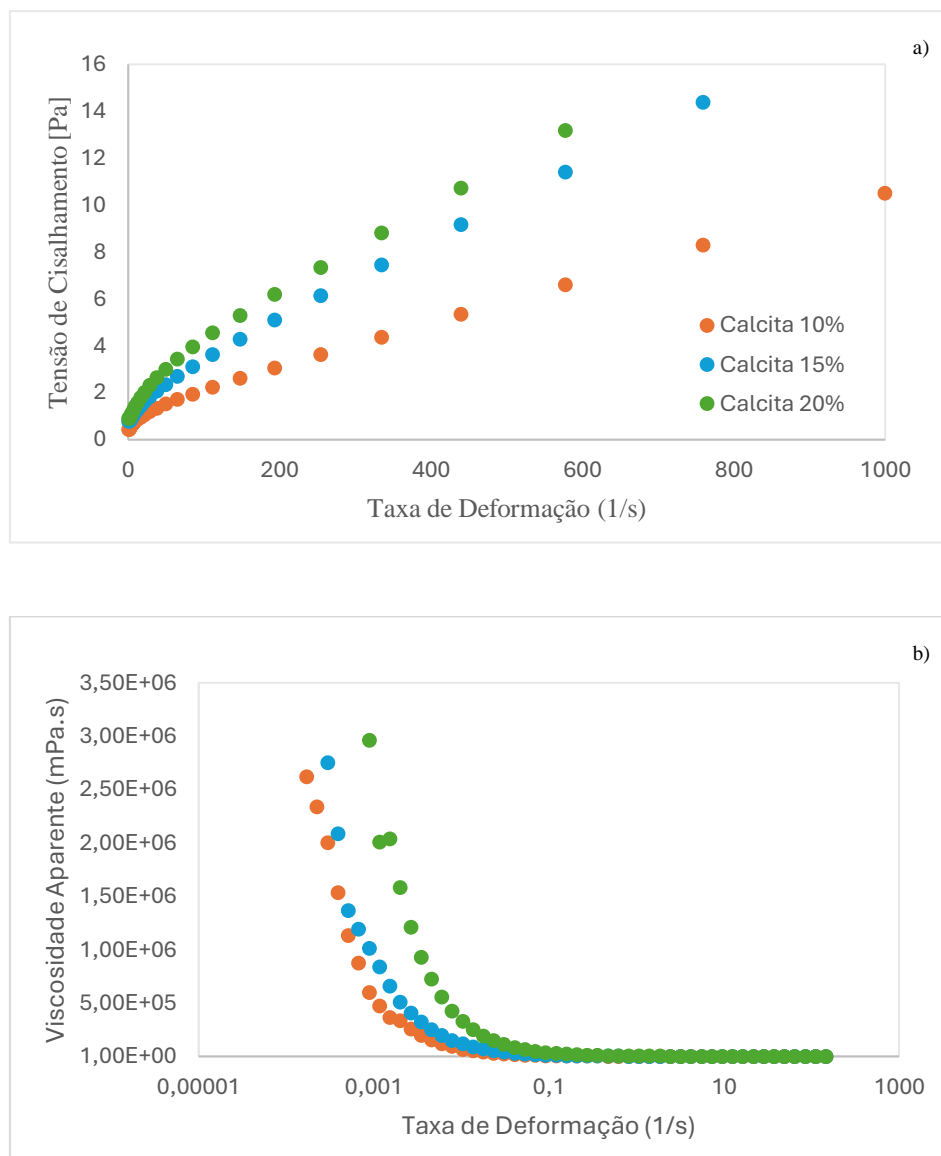


Figura 4.9 Dados de comparação de curva de fluxo para partículas da Calcita utilizada nos experimentos em bancada II, a concentrações de 10%, 15% e 20%: a) Dados de tensão de cisalhamento por taxa de deformação; b) Dados de viscosidade por taxa de deformação Fonte: AUTOR, 2024.

4.2 Ensaaios de Sedimentação

4.2.1 Unidade de Bancada I: Testes Preliminares

Os testes preliminares foram constituídos de experimentos iniciais essenciais para o entendimento da funcionalidade da técnica de investigação por sensores de pressão. Possibilitaram compreender a análise do monitoramento da concentração de sólidos e o funcionamento do transmissor de pressão. Os testes além de contribuírem para o estudo da sedimentação através de um método inovador, também foram fundamentais para identificar algumas falhas e implementar correções visando experimentos posteriores.

Para realizar a investigação quantitativa da sedimentação da barita em diversas concentrações volumétricas e da Calcita, obteve-se a dinâmica da sedimentação por análise da transmissão diferencial de pressão. Os resultados mostram as concentrações iniciais da suspensão de 10% e 20% de partículas sólidas de barita e 20% de Calcita. Ao longo da coluna cilíndrica de acrílico foram inseridas 4 tomadas de transmissores. Em um intervalo de quatro horas de sedimentação os dados foram coletados através do software desenvolvido no LabView para a análise de perfis de concentrações.

4.2.1.1 Concentração Volumétrica de 10% v/v de Barita

A Figura 4.10 apresenta os resultados obtidos para o monitoramento da concentração de sólidos ao longo do tempo e espaço, utilizando dados da variação média da pressão diferencial em pontos pré-selecionados ao longo da coluna. Estes resultados representam a concentração média da suspensão acima do ponto considerado e estão relacionadas as variações de densidade da zona investigada.

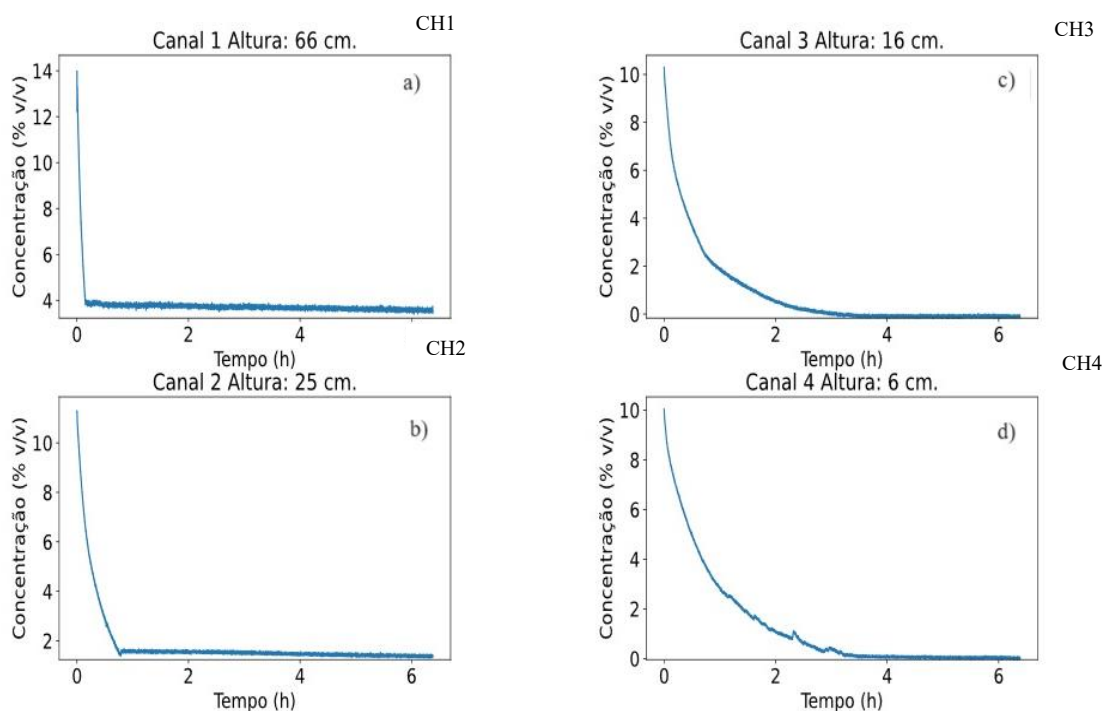


Figura 4.10. Triplicata dos dados de concentração por tempo a concentração de 10% de Barita. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2022.

O canal 1 (CH1) localizado a uma altura de 66 cm em relação à base da coluna, foi identificado a queda da concentração de sólidos a uma velocidade de sedimentação significativamente alta, a um tempo menor que meia hora de teste. Durante o teste a concentração de sólido permaneceu em decaimento até passagem da interface descendente pelo ponto de medição da pressão. Mas após a passagem foi observado que a concentração volumétrica não atingiu zero. Esse comportamento ocorreu devido à presença de uma fina camada de espumado material sólido na região acima do sensor do transdutor de pressão, conforme a Figura 4.11.



Figura 4.11. Ensaio de sedimentação com barita, evidenciando a presença da frente de sedimentação e da espuma contendo partículas sólidas aderidas. Fonte: Autor: 2023.

Para os pontos de tomada da pressão em CH2 (Figura 4.10-b) e CH3 (Figura 4.10-c) que estão situados a 25 cm e 16 cm da base a velocidade de sedimentação sofre uma redução contínua e por maior tempo quando comparado ao canal 1 (CH1). A concentração de sólidos reduz em ambos os casos até chegar a um patamar de estabilização. Com a estabilização é possível entender que ocorreu a passagem da interface de sedimentação pelo sensor do transdutor diferencial de pressão. No caso do canal 2 a passagem ocorre próximo a 1 hora e no canal 3, 2 horas e 30 minutos. O que se mostra coerente com o processo físico da sedimentação em batelada.

No transmissor próximo a base da coluna de acrílico denominado como CH4, a 6 cm da base, é observado ligeiras oscilações como identificado na Figura 4.10-d. O resultado pode ser atribuído ao movimento das partículas sólidas em direção a base da coluna de sedimentação. A velocidade de sedimentação terminal das partículas aumenta com seus tamanhos e densidades proporcionalmente ao número de Reynolds das partículas (FERGUSON E CHURCH, 2004). Portanto, as partículas maiores sedimentam primeiro e a uma velocidade maior que as menores. O movimento das partículas para baixo desloca o volume de líquido igual de fluido intersticial para cima. À medida que o sólido se move para baixo o fluido ao seu redor é empurrado para cima com uma velocidade ascensional. O contrafluxo pode ser forte o suficiente para carregar partículas

menores ou mais leves para cima (AMY *et al.*, 2006). Porém, se a tal velocidade ascendente da fase líquida for maior que a da fase sólida, a partícula sólida não consegue sedimentar tão facilmente. Então o fluxo de líquido carrega essas partículas de tamanhos menores a uma velocidade ascendente (Figura 4.12).

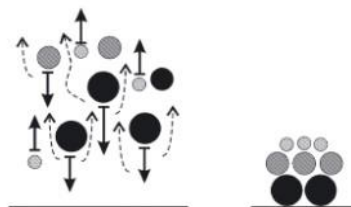


Figura 4.12 Representação esquemática da segregação das partículas em suspensões com concentrações iniciais de sólidos intermediárias. Fonte: AMY *et al.* (2006).

A análise visual da queda da interface da sedimentação também foi acompanhada neste teste e pode ser observada na Figura 4.13. Junto com os quatro pontos obtidos via medidas de pressão. O comportamento da queda da interface segue de acordo com o esperado para o processo de sedimentação onde tem-se no início um trecho linear que representa a zona de sedimentação livre (concentração constante é igual à da suspensão inicial) com velocidade de sedimentação constante. Na sequência a curva torna-se não linear indicando a redução da velocidade de sedimentação devido ao aumento da concentração da suspensão. A curva finaliza com uma tendência assintótica em direção ao eixo do tempo, simbolizando a zona de compactação do sedimento. Pode-se observar por esta figura que os quatro pontos de altura e tempo da passagem da interface, gerados pela análise com transmissores de pressão, apresentam boa coincidência com os observados pela investigação visual, indicando desta forma que a metodologia proposta pode ser viável para acompanhar a sedimentação de partículas. A discrepância apresentada no monitoramento pela pressão no ponto 4 (CH4) se dá pelo fato do sedimento cobrir o sensor do transdutor de pressão neste caso. Quando isto ocorre, não é mais possível determinar a concentração da suspensão, visto que a região é um meio poroso, fato este também descrito por Nocoñ (2010).

Cabe destacar que os testes foram realizados em triplicata tanto para a curva de sedimentação visual como para os ensaios com transdutor de pressão, gerando assim os erros experimentais. É oportuno comentar que as barras de erro são verticais no caso da curva de sedimentação, pois representam o erro na leitura da altura da interface. Já no

caso dos pontos obtidos por análise de diferencial de pressão, os erros são na variável do tempo para determinar a passagem da interface, gerando barras de erro horizontais.

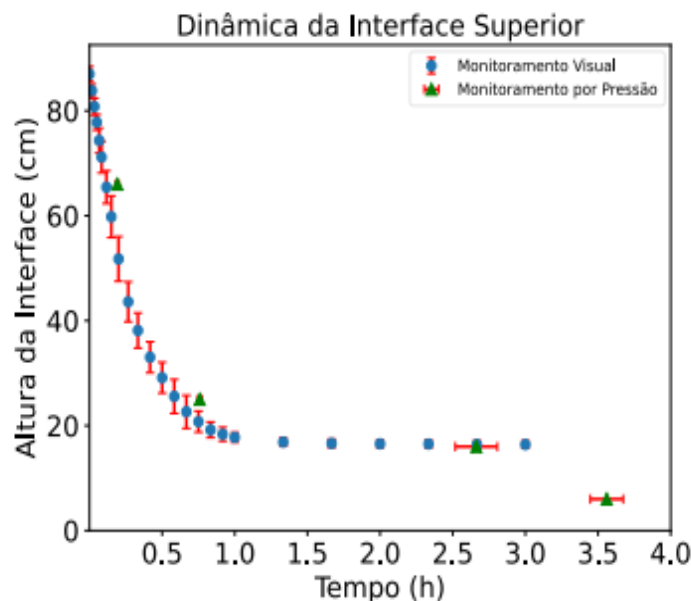


Figura 4.13. Curva de comparação da queda da interface superior ao longo do tempo, para a análise visual e monitoramento da pressão. Fonte: AUTOR, 2023.

O estudo da sedimentação também foi analisado através da avaliação da queda de pressão entre dois transmissores como pode ser observado na Figura 4.14. Onde a curva azul representa o diferencial de pressão entre os canais CH1 e CH2 e a curva laranja representando entre os canais CH3 e CH4.

Analisando a curva azul referente a região compreendida entre os canais CH1 e CH2, localizados a 66 cm e 26 cm da base da coluna identifica-se uma redução contínua e rápida da concentração volumétrica de sólidos até aproximadamente 50 minutos de teste. Esse comportamento já era esperado, uma vez que os transmissores próximos ao topo da coluna de sedimentação detectam a tendência de migração de partículas para a parte inferior da coluna. Também pode-se identificar que a velocidade de sedimentação é elevada até chegar ao ponto de estabilização, indicando que a frente de sedimentação passou entre os canais.

Foi identificado um aumento inicial da concentração volumétrica de sólidos até aproximadamente 30 minutos de teste e posteriormente uma queda contínua da concentração. Esse comportamento indica que a região entre os canais CH3 e CH4 recebe grande quantidade de sólidos provenientes da rápida sedimentação acima do canal 3, como anteriormente analisado. Ao passar por um ponto de máxima concentração, essa

começa a diminuir pois não há mais entrada de sólidos provenientes das regiões superiores da coluna.

A curva laranja que representa a região entre os transmissores CH3 e CH4, localizados a uma altura de 16 cm e 6 cm da base da coluna, identifica-se um aumento inicial da concentração volumétrica de sólidos até aproximadamente 30 minutos de teste e posteriormente uma queda contínua da concentração. Esse comportamento indica que a região entre os canais CH3 e CH4 recebe grande quantidade de sólido provenientes da rápida sedimentação inicial acima do canal 3, como anteriormente analisado. Ao passar por um ponto de máxima concentração, essa começa a diminuir pois não há mais entrada de sólidos provenientes das regiões superiores da coluna. Na sequência a concentração de sólidos reduz indicando a saída de sólidos da região até estabilizar em uma concentração um pouco superior a zero. Possivelmente formou-se a zona de compactação e a medida da concentração de sólidos fica prejudicada.

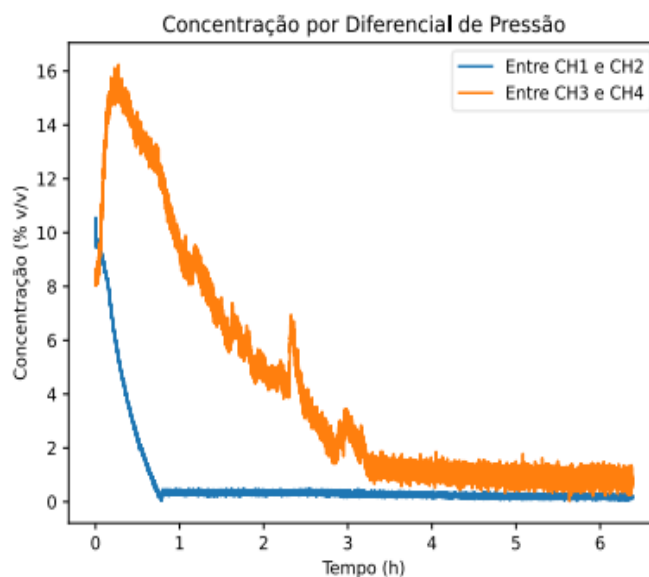


Figura 4.14. Curva de evolução da concentração volumétrica por diferencial de pressão para teste de concentração volumétrica de 10% v/v de barita. Fonte: AUTOR, 2023.

O tempo que caracteriza a passagem da interface pelos canais de medição foi registrado. Esse tempo teve o objetivo de permitir uma comparação posterior com a curva clássica de sedimentação, que relaciona a altura da sedimentação em função do tempo. Dessa forma, torna-se viável avaliar o comportamento do sistema em termos de dinâmica da sedimentação e do fluxo através dos canais dos transmissores.

4.2.1.2 Concentração Volumétrica de 20% v/v de Barita

Foram realizados teste preliminares na concentração de 20% v/v de barita. Na unidade de bancada I os resultados são apresentados na Figura 4.15. A posição dos canais para apenas este teste, foi trocada para avaliar a precisão do transmissor e detectar problemas. Para o canal 1 explicito em “a” na figura abaixo, tem-se o início da sedimentação começando a 20 % de concentração e logo imediatamente a queda das partículas chegando aproximadamente em 3%. Esse decaimento foi observado a uma taxa de velocidade alta que está relacionada com as partículas de diâmetros maiores sedimentando mais rapidamente. Em aproximadamente a 1 hora e 10 minutos é identificado a passagem da interface superior. O que promoveu uma aparente estabilização. Posteriormente, 4 horas depois, uma nova queda da interface se observa, indicando movimentação das partículas em uma velocidade mais lenta do que a primeira, concluindo com a deposição do material particulado até chegar ao platô constante. Neste momento entendeu-se que todo material foi movido para a região inferior ao CH1.

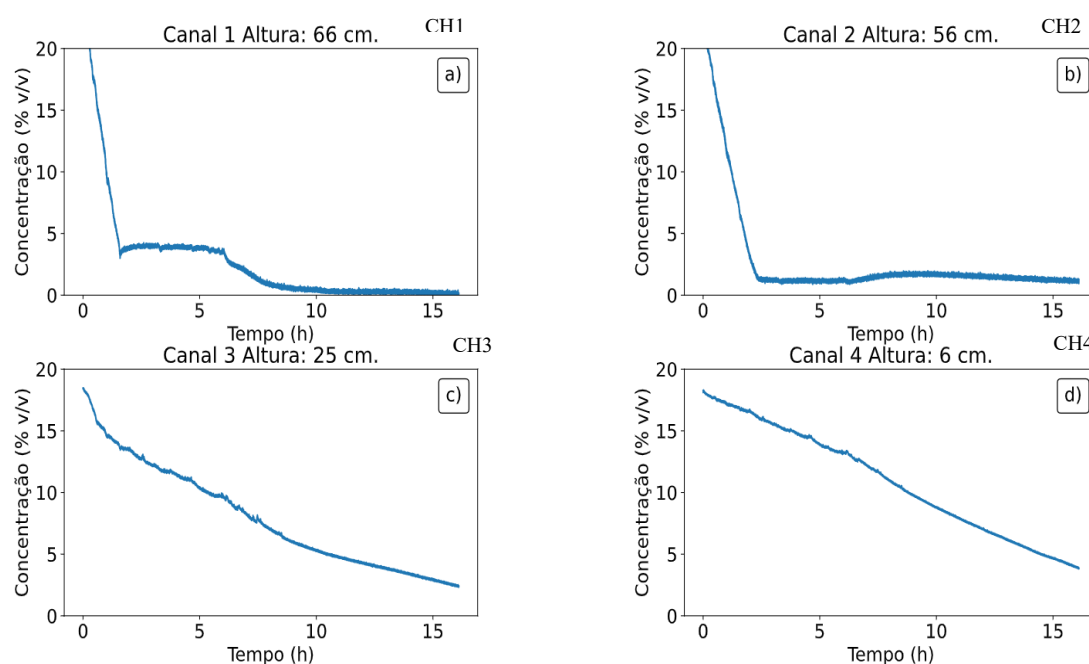


Figura 4.15. Dados de concentração volumétrica por tempo a concentração de 20% de Barita. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2023.

O canal 2 apresenta uma dinâmica semelhante ao canal 1 e percebe-se a passagem da interface por volta de 4 horas de teste, levando a concentração de sólidos a zero. Já para os canais 3 e 4 (CH3), detectou-se uma diminuição na velocidade de sedimentação

e na concentração de sólidos de forma contínua sendo que não foi atingido um patamar de estabilidade, ou seja, não houve a passagem da interface dentro do período do teste. Este fato indica que para suspensões mais concentradas é necessário maior tempo de observação visto que a sedimentação é mais lenta devido ao efeito de população (PEÇANHA, 2014).

Assim como na análise de concentração a 10% de v/v de baritina, foi possível no experimento de 20 % estudar e aquiritar dados de pressão média entre dois transmissores, como mostrado na Figura 4.16. Os valores médios de concentração foram obtidos entre os canais CH1 e CH2, e entre os canais CH3 e CH4. diferentemente do teste com 10% de barita, A curva azul mostra que no início do teste, até aproximadamente 1 hora, têm-se uma queda na concentração de partículas. Após 2 horas de teste estabiliza e com 5 horas aumenta a concentração de sólidos novamente. Esse fato ocorreu devido a interação das partículas pelo efeito de população.

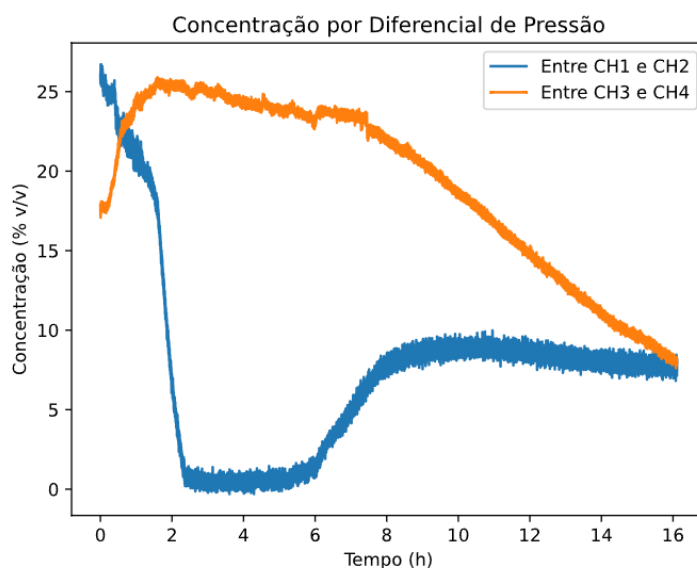


Figura 4.16. Evolução da concentração por diferencial de pressão a uma concentração volumétrica de 20% de barita. Fonte: AUTOR, 2023.

A curva laranja, que indica a diferença de pressão entre os canais CH3 e CH4, localizados mais para o fundo da coluna, mostra um aumento contínuo da concentração de sólidos até a passagem por um ponto de máximo, aproximadamente em 3h de teste, e o início da queda da concentração. Entretanto verifica-se que seria necessário um tempo bem maior de ensaio para observar a passagem da interface por esta região.

4.2.1.3 Concentração Volumétrica de 20% v/v de Carbonato de Cálcio

A técnica de avaliação da concentração de sólidos ao longo do tempo por monitoramento de pressão hidrostática foi aplicada em fluidos mais complexos contendo Carbonato de Cálcio e Goma Xantana. Este fluido foi uma formulação fornecida pela Petrobras, e possui uma constituição mais complexa, tendo goma xantana como viscosificante, o que sugere uma dinâmica mais complexa de sedimentação por se tratar de um fluido altamente não newtoniano. Apresentaram uma tendência a estabilização com aproximadamente 60 horas de ensaio, Figura 4.17, entretanto a concentração não tende a zero pois verifica-se que uma parcela dos sólidos não sedimenta, formando uma espécie de colóide. Após 65 horas pode-se visualizar um comportamento oscilatório nos dois primeiros canais, diferente do que ocorre com os próximos a base da coluna. Essa conduta sugere que as partículas maiores sedimentaram mais rapidamente do que as menores, que permaneceram por um tempo próximo aos transmissores. O CH3 mostrou o comportamento esperado da sedimentação, porém para este tempo determinado não se estabilizou, assim como os outros.

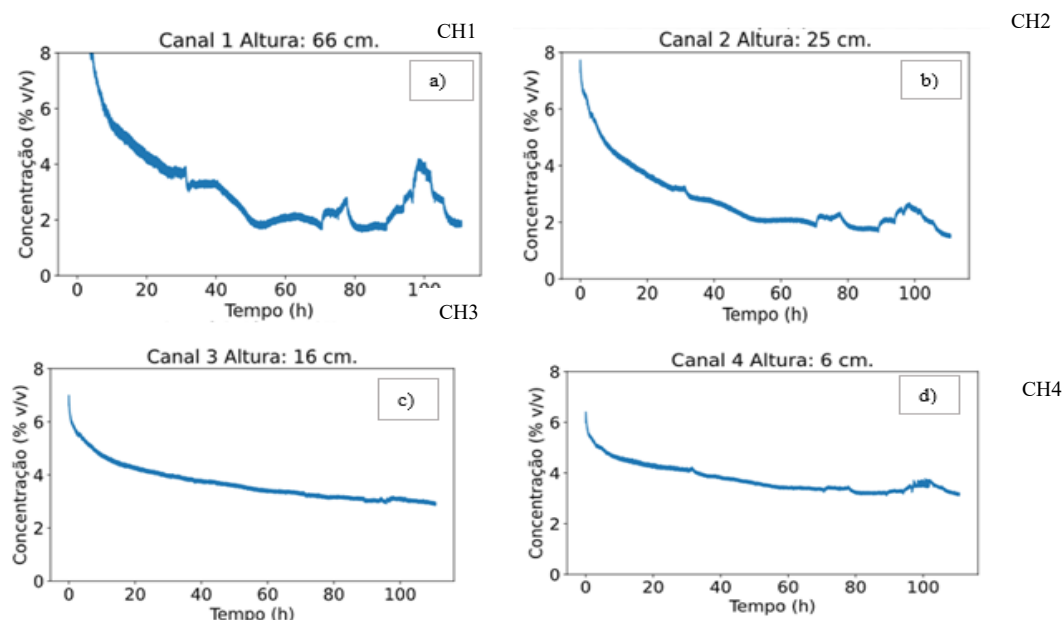


Figura 4.17. Dados de concentração volumétrica com 20% de Carbonato de Cálcio. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2023.

Para o canal 4, Figura 4.17-d, identificou-se a diminuição da concentração de sólidos ao longo do tempo. Em todos os pontos de medidas do teste, foi constatado que a

curva de sedimentação não atingiu a estabilização e nem a passagem da interface. Isso deve a complexidade do fluido que possui, devido a presença de goma xantana, que contribui para o aumento significativo da viscosidade aparente do fluido, influenciando na reologia do fluido. Portanto, torna-se necessário prolongar o tempo de teste de sedimentação para avaliar de modo mais completo o comportamento do fluido e a sedimentação da partícula sólida.

Da mesma forma que nos ensaios anteriores, foi possível analisar a pressão média entre dois transmissores conforme a Figura 4.18. Entre CH1 e CH2, observou-se a queda da concentração ao passar do tempo. Por ser um fluido complexo foi possível visualizar a curva de sedimentação, mas a passagem da interface não pôde ser identificada. Já entre CH3 e CH4 ocorreu um aumento da concentração nas primeiras 25 horas, seguido por uma diminuição. Passadas 80 horas de sedimentação observa-se um aumento abrupto de concentração. A dinâmica do fenômeno foi complexa nessa região próxima a base da coluna, indicando a ocorrência de influências variáveis no processo de sedimentação. A característica do fluido atual não contribuiu para a visualização da sedimentação pois a suspensão por ser uma mistura complexa com carbonato de cálcio, mostrou-se opaca. A opacidade do material que dificultou a percepção visual. Entretanto, destaca-se que a técnica de monitoramento da pressão indica as alterações na concentração da suspensão e permite um acompanhamento da dinâmica da sedimentação.

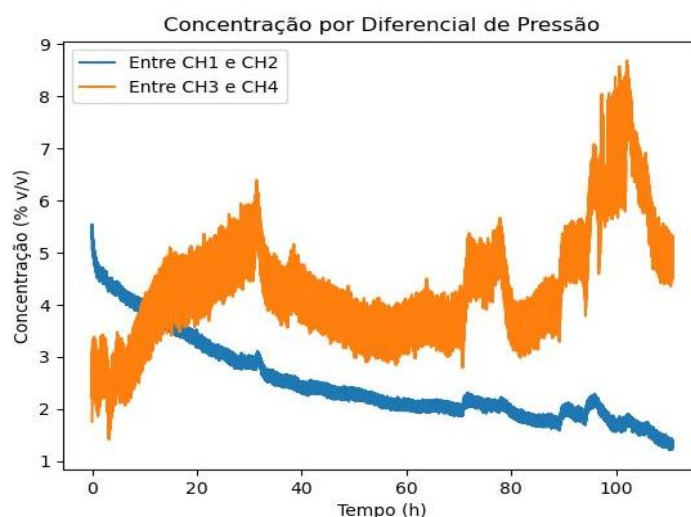


Figura 4.18. Evolução da concentração por diferencial de pressão para o Carbonato de Cálcio. Fonte: AUTOR, 2023.

4.2.2 Unidade de Bancada II

4.2.2.1 Concentração de 10% v/v de Barita

A análise da técnica de pressão mostrada na Figura 4.19 faz referência a um fluido de concentração de 10% de barita. O gráfico abaixo mostra a média (azul escuro) e o erro padrão (azul claro), com intuito de fornecer informações mais precisas dos dados medidos. No canal 1, CH1, localizado a 120 cm da base da coluna, observa-se uma rápida queda de partículas a uma velocidade elevada. Por volta de uma hora de teste, é possível observar a passagem da interface superior pelo sensor do transdutor de pressão. Nota-se que a concentração volumétrica se aproxima de zero, mas não chega a atingir esse valor durante o tempo de sedimentação. Isso ocorre devido à presença de uma fina camada de espuma próxima ao topo da coluna, que permaneceu durante o teste. Essa camada resulta em uma ligeira concentração de sólidos nessa região, impedindo que a concentração atinja zero.

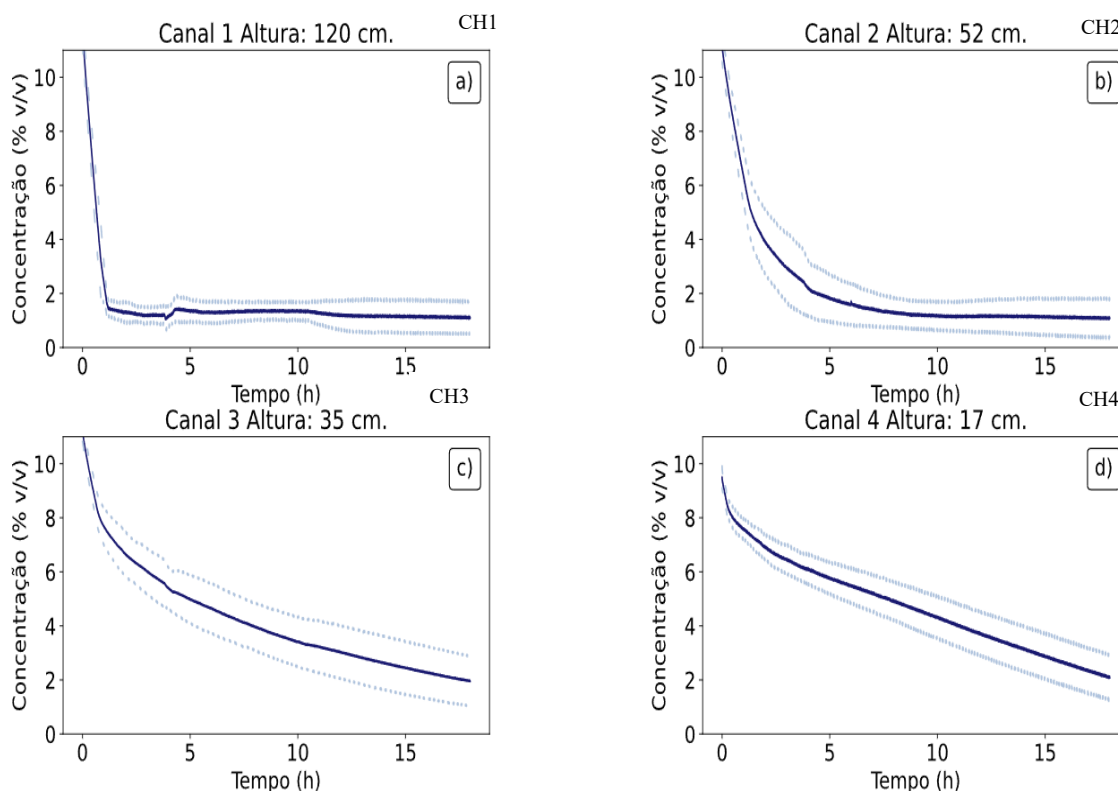


Figura 4.19. Dados de concentração de 10% de Barita, com a média e o erro padrão. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2024.

Os canais CH2 situado a 52 cm apresentam inicialmente uma queda de partículas durante um tempo de sedimentação entre 1,5 hora. A concentração diminuiu até chegar ao ponto de estabilização, indicando que as partículas migraram para a região inferior da coluna de sedimentação e houve a passagem da interface. Observa-se que a concentração não chega a ficar zero pois uma parte das partículas fica em suspensão de forma estável. No caso dos canais 3 e 4, CH3 e CH4, não foi possível visualizar a passagem da interface, ao contrário do que foi observado na Unidade de Bancada II, conforme mostra os testes preliminares na Figura 4.10 no teste na Unidade de Bancada I. No entanto, é importante ressaltar que a Unidade de Bancada II tem uma altura maior o que indica que o teste de sedimentação necessitará de mais tempo para a visualização da interface.

Foi realizado a variação média do diferencial de pressão, Figura 4.20 para o teste de concentração volumétrica de 10% para a Unidade de Bancada II. A leitura do diferencial de pressão entre os canais CH1 E CH2, que são transdutores próximo ao topo da coluna, indica uma queda da velocidade de sedimentação em aproximadamente uma hora de teste. A dinâmica ocorreu devido a migração das partículas para a base da coluna assim que o fluido é vertido no recipiente, indicando rápidas taxas de decantação. A concentração de sólidos inicialmente aumenta por um certo período até que começa a decair até em certo momento em que ocorre a passagem da interface descendente pelo ponto de medição em que se situa o transdutor. Quando a interface atinge o ponto de leitura da pressão, as concentrações de sólidos aproximam de zero. Entende-se que o comportamento está relacionado a fase contínua da suspensão, assim sendo, a água, que tem uma baixa viscosidade contribui para a alta taxa de sedimentação na região delimitada.

As curvas em laranja, com pontos de medição próximo a base da coluna de sedimentação, inicialmente apresentam um aumento da concentração volumétrica de sólidos, com um tempo atribuído a queda de partículas. A concentração de sólidos após um tempo aproximado de quatro horas começa a declinar, sugerindo uma realocação das partículas para a formação do sedimento, porém não estabiliza. O movimento das partículas para originar um sedimento compactado reduz a concentração volumétrica de sólidos no ponto de medição. E novamente, em escala ampliada para testes experimentais, a análise de pares de transmissores foi primordial para se obter informações locais do processo de sedimentação.

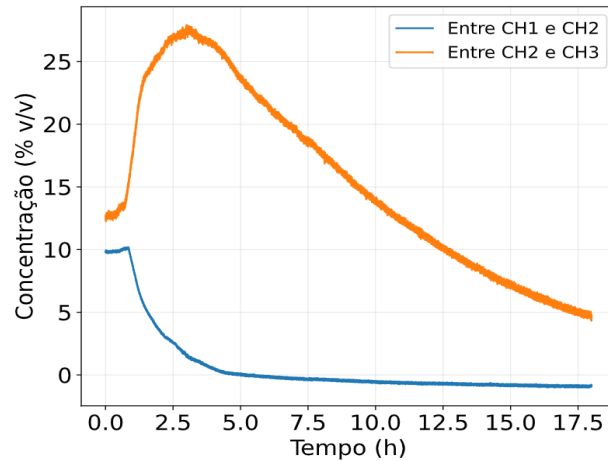


Figura 4.20. Evolução da concentração por diferencial de pressão para a concentração volumétrica de 10% na Unidade de Bancada II. Fonte: AUTOR, 2024.

A Figura 4.21 apresenta em um único gráfico o resultado médio das triplicatas pode-se observar que no canal 1 (CH1), curva em azul, um comportamento padrão esperado para a sedimentação. É possível identificar a passagem da interface descendente no tempo de 4 horas até a estabilização da sua concentração volumétrica. Esta região é possui alta taxa de sedimentação das partículas, levando a uma rápida velocidade de sedimentação e resultando na abertura do clarificado. Essa descrição está em consonância com os estudos científicos realizados por Coe e Cleverger (1916).

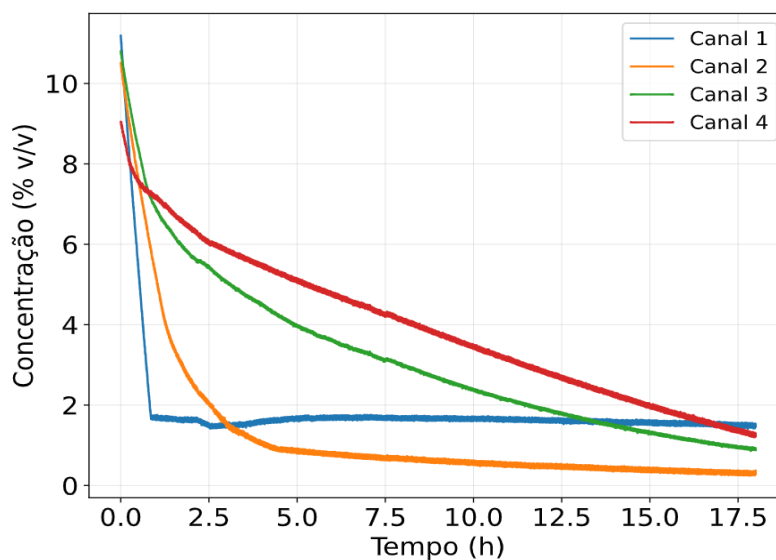


Figura 4.21. Evolução temporal dos dados da triplicata da sedimentação a concentração volumétrica de 10% para todos os pontos de medição. Fonte: AUTOR, 2024.

No canal 2 (CH2), representado pela curva em laranja, observa-se um aumento do tempo de taxa de sedimentação devido a elevação de concentração de material sólido para este ponto de medição. A interface passa pelo sensor até obter a estabilização da concentração volumétrica. Todavia, essa curva passa abaixo da linha azul. Durante o teste, próximo ao sensor 1, é visualizada uma fina camada de espuma com a presença de partículas sólidas, o que explica o fato de a concentração não atingir zero nesse ponto. Em contrapartida, o sensor 2 (CH2), para a curva laranja, está mais distante dessa camada de espuma, portanto, não ocorreu a interferência no teor de concentração volumétrica de sólidos nesse ponto. Isso ocorre porque, após um período de 4 horas desde a passagem da interface, a camada de sólidos na espuma continua com sólidos suspensos, compostas por partículas finas que ainda não sedimentaram nesse intervalo de tempo. Nos sensores de pressão localizados próximos à base coluna não se observa a passagem da interface, devido ao aumento da concentração de sólidos nessa região. Conforme o tempo avança, a sedimentação ocorre lentamente devido à grande concentração de sólidos próxima à base da coluna. E ainda nessa região, há uma maior interação entre as partículas para a formação da estrutura compactada.

4.2.2.2 Concentração de 15% v/v de Barita

Para a concentração volumétrica de 15% de barita e densidade do fluido de 1,25 g/cm³ foram analisados os pontos de medições ao longo na altura da coluna de acrílico, Figura (4.22). Ao investigar os canais CH1 observa que teve a passagem da interface diferente do que ocorre em CH2 e CH3 por conta da complexa interação das partículas com a fase líquida resultando em dinâmicas diferentes nos canais. Além do mais, a suspensão em questão possui uma concentração volumétrica de barita superior à do teste de 10%, influenciando na velocidade de sedimentação, devido ao efeito de população. Elevadas concentrações de material sólido resultam em uma sedimentação mais lenta e com um aumento gradual do tempo de sedimentação. Logo, isso indica que o teor volumétrico do material particulado desempenha um papel importante na conduta da fenomenologia. Isso destaca a importância da concentração volumétrica na investigação da sedimentação, uma vez que influencia diretamente na eficiência do processo.

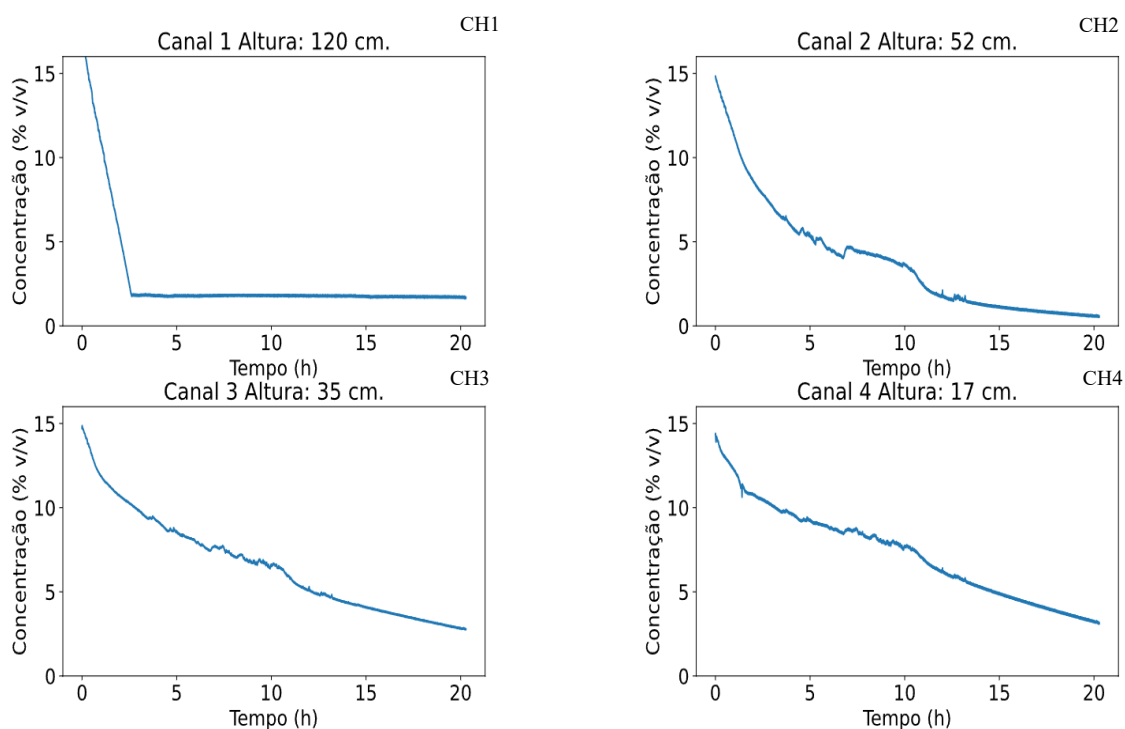


Figura 4.22. Dados de concentração volumétrica com 15 % de Barita. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2024.

O diferencial de pressão também foi avaliado para o teste de concentração volumétrica de 15% (Figura 4.23) de barita foi comparado com o de 10% (Figura 4.14). Para a curva em azul próximo ao topo da coluna, identifica-se que inicialmente uma diminuição do particulado sólido, ao longo do tempo. Após aproximadamente duas horas de sedimentação, nota-se uma aparente oscilação, que pode indicar um pequeno aumento na concentração volumétrica de sólidos local, relacionado à sedimentação das partículas que ficam aprisionadas na camada de espuma próxima ao topo da coluna, seguido da diminuição da concentração. Já para o segundo par de transmissores, observa-se um aumento na concentração, porém o teste não apresentou a passagem da interface e não estabilizou. Isso sugere um prolongamento dos testes de sedimentação para atingir o platô de estabilização e visualizar a interface.

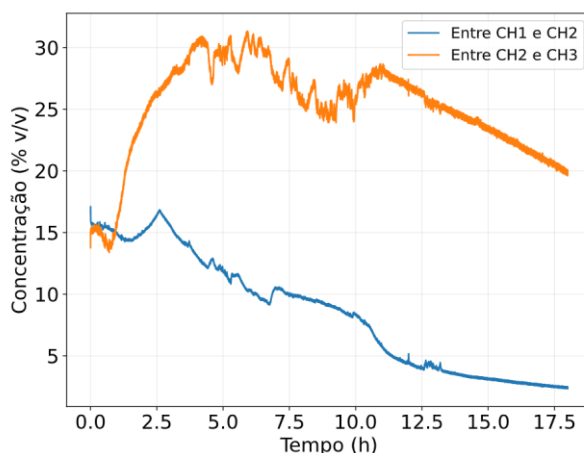


Figura 4.23. Evolução da concentração por diferencial de pressão para a concentração volumétrica de 15% na Unidade de Bancada II. Fonte: AUTOR, 2024.

4.2.2.3 Concentração de 20% v/v de Barita

Os resultados dos testes experimentais para a concentração volumétrica de 20%, são mostrados na Figura 4.24. Assim como nos experimentos com concentrações menores, é possível observar, que no canal CH1, a curva da sedimentação apresenta um comportamento similar aos testes anteriores. E identifica-se a queda da concentração se aproximando de zero à medida que a interface passa pelo ponto de medição. No entanto, no CH2, CH3 e CH4, não é possível identificar a passagem da interface devido a elevada concentração de partículas sólida.

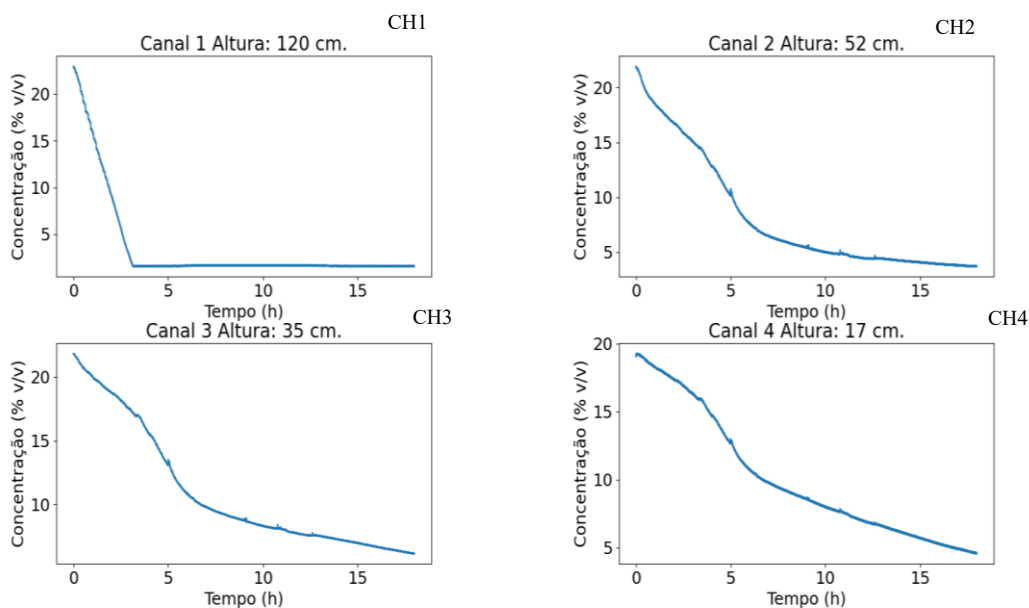


Figura 4.24. Dados de concentração volumétrica com 20% de Barita. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2024.

Para a análise do diferencial de pressão (Figura 4.25), entre os canais CH1 e CH2, representados pela curva em azul, ocorre inicialmente um aumento na concentração de sólidos. Isso se deve ao fato de que, no início do experimento, houve um acúmulo local maior de sólidos devido ao volume inicial de partículas, o que resultou em um tempo de sedimentação mais longo. O processo de sedimentação pode ser afetado pelos fenômenos interfaciais que influenciam a sedimentação (FITCH, 1979). A interação entre as partículas pode ser influenciada por diversas forças intermoleculares, como as forças de van der Waals, que promovem uma maior adesão entre elas, especialmente quando há uma concentração volumétrica elevada em determinada região. Já entre os canais CH3 e CH4, observa-se um aumento gradual e significativo na concentração de sólidos, devido à migração das partículas para a base da coluna. Posteriormente, ocorre uma redução gradativa na concentração nessa região, indicando uma diminuição na quantidade de partículas presentes. No entanto, não há passagem da interface e nem estabilização da concentração volumétrica nesse ponto de medição.

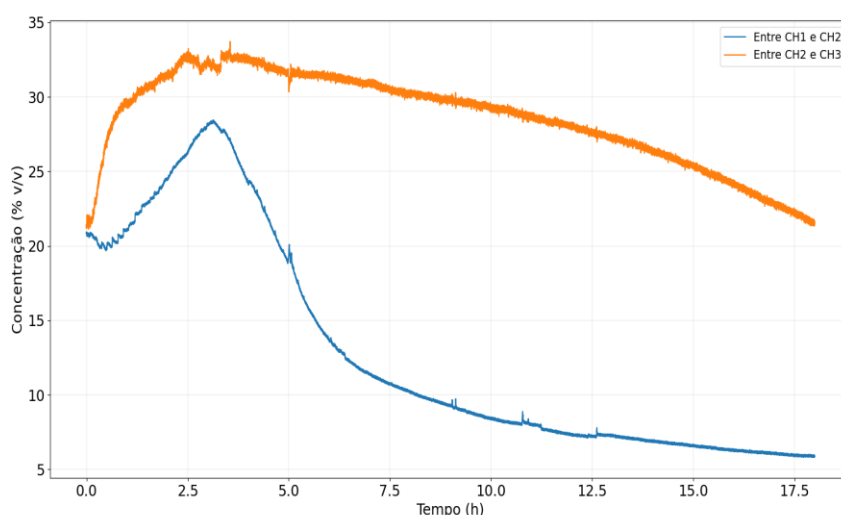


Figura 4.25. Curva de evolução da concentração por diferencial de pressão para a concentração volumétrica de 20% na Unidade de Bancada II. Fonte: AUTOR, 2024.

4.2.2.4 Comparação entre as concentrações para cada canal

A Figura 4.26 representa as comparações para as concentrações volumétricas de 10%, 15% e 20% de barita em cada canal. Para o canal 1 (CH1) a 120 cm, próximo ao topo da coluna de sedimentação, identifica-se que para todas as concentrações o comportamento

apresenta uma similaridade de decaimento linear. O teste experimental com 10% de barita sedimenta a uma velocidade maior do que os demais, isso é devido ao volume de concentração de partículas sólidas ser menor, o que influencia na dinâmica de sedimentação.

No canal 2, o teste com concentração de 10% apresentou um comportamento menos transiente e oscilatório quando comparado com os testes a 15% e 20%. A sedimentação é visualizada para os 10% com a passagem da interface, mostrando um platô constante de concentração de sólidos. Em contraste, para as concentrações volumétricas de 15% e 20%, onde a quantidade de sólidos é maior, para o tempo de teste de aproximadamente 15 horas, não foi possível visualizar a passagem da interface.

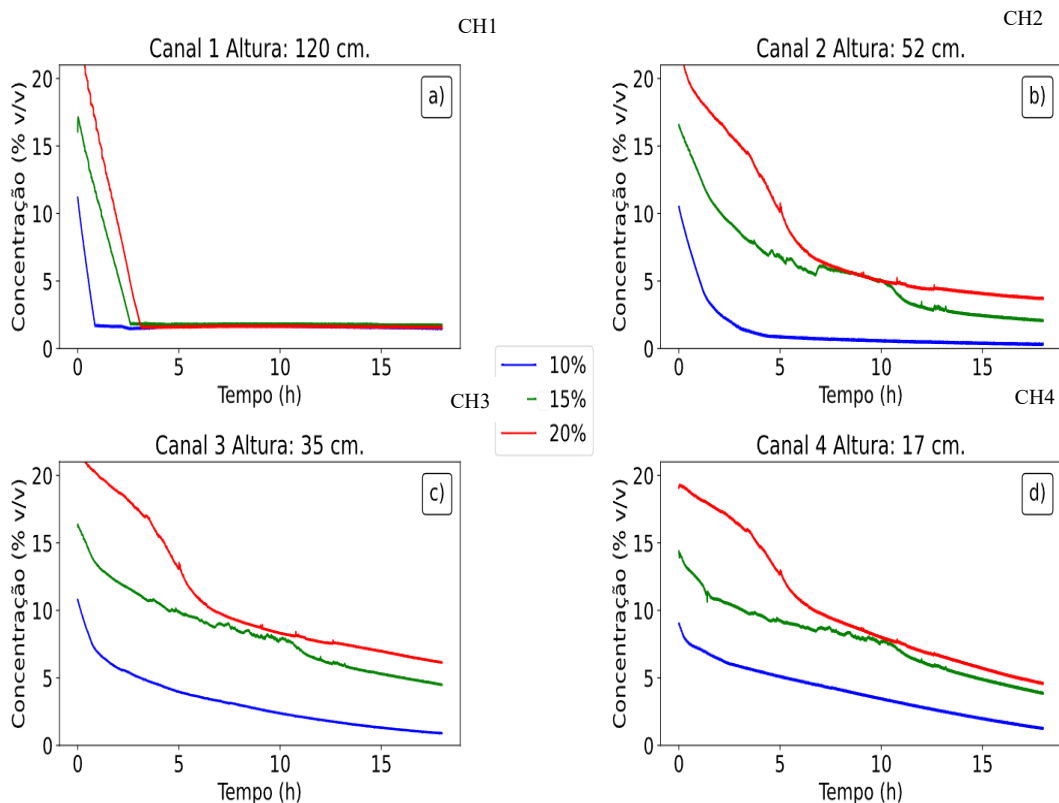


Figura 4.26. Dados de comparações das concentrações volumétricas de 10%, 15% e 20% de barita. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2024.

Os canais 3 e 4 apresentaram um comportamento similar, sem a formação de um platô com concentração zero, o que indica que a passagem da interface não ocorreu. Isso se deve à proximidade desses canais à base da coluna. Devido à sua maior concentração volumétrica de sólidos, as partículas têm uma tendência maior a se depositarem, resultando em uma velocidade de sedimentação mais lenta. Quanto maior a concentração de sólidos na suspensão, mais tempo leva para que as partículas.

Ao realizar comparações entre os testes realizados na Unidade de Bancada I e II com a barita, identifica-se que em concentrações mais baixas, é possível visualizar a passagem da interface em todos os canais, como é o caso da concentração volumétrica de 10% para a primeira unidade. Não obstante, na segunda Unidade de Bancada, com a mesma concentração de partículas sólidas, nota-se que a passagem da interface é ocorreu apenas nos pontos de medição CH1 e CH2. No canal 3 (CH3), localizado próximo a base da coluna de acrílico, não detectou a passagem da interface devido a presença de sólido região, acumulados para formar o compactado. Quando se trata de concentrações volumétricas maiores, como 15% na Unidade II e 20% para a Unidade I e II, constatou-se que a passagem da interface foi impedida devido ao aumento da concentração volumétrica de barita.

A distribuição granulométrica tem um impacto significativo na sedimentação influenciando na eficiência e desempenho do processo. Em concentrações mais elevadas, a sedimentação tende a ocorrer de forma mais lenta, enquanto em baixas concentrações de partículas sólidas, a sedimentação ocorre separadamente, e a interação entre elas é negligenciável. As partículas maiores e mais pesadas, possuem maior velocidade de sedimentação, e decantam primeiro. Isso ocorre pelo fato de possuírem maior massa e uma força gravitacional maior que age sobre elas. Em contrapartida, as partículas de granulometria fina possuem uma tendência em permanecer nas suspensões por mais tempo, à vista disso, sedimentam mais lentamente, como corroborado por França (2007). Ainda segundo o entendimento explícito do autor, quando se tem uma alta concentração de partículas sólidas, a densidade da suspensão aumenta, resultando a uma resistência maior ao movimento das partículas. Para mais, logo que a concentração de partículas aumenta pode existir uma interação uma com as outras, formando aglomerados que influenciam na velocidade de sedimentação. Sendo assim, quanto maior for a concentração de partículas sólidas, mais lento é sua velocidade de sedimentação.

Para os estudos de sedimentação em concentrações elevadas sólidos, é importante ressaltar que, com aumento do teor de sólido na suspensão, aumenta as colisões entre as partículas. Além de que, a trajetória da partícula é influenciada pelo movimento das outras que estão na suspensão e pelo deslocamento da água pelos canais entre elas. Sendo assim, faz com que a velocidade terminal da partícula seja menor do que a observada em queda livre, definida por sedimentação impedida (POSSA, 2004). Esse fenômeno ocorre porque as partículas são “impedidas” em sua queda por outras partículas e pelo fluxo de líquido, resultando em uma velocidade de sedimentação mais lenta.

4.2.2.5 Concentração Volumétrica de 10% v/v de Calcita

A análise da sedimentação utilizando a técnica de leitura de pressão na Unidade II de Bancada, também foi avaliada com material diversificado, a calcita. A análise permitiu ampliar o escopo da metodologia, contribuindo para compreensão de como diferentes partículas sólidas respondem a sedimentação e de como os transmissores de pressão detectam o fenômeno sob condições variadas. A Figura 4.27 apresenta os dados com suspensão de calcita 10% v/v na Unidade II de Bancada. Pode-se perceber que a passagem da interface no CH1 ocorre aproximadamente com 1 hora após o início do teste de sedimentação. A concentração se estabiliza, mas não atinge a zero, pois diferente do que acontece com a barita, a calcita apresenta um fluido turvo com presença de partículas em suspensão (Figura 4.28).

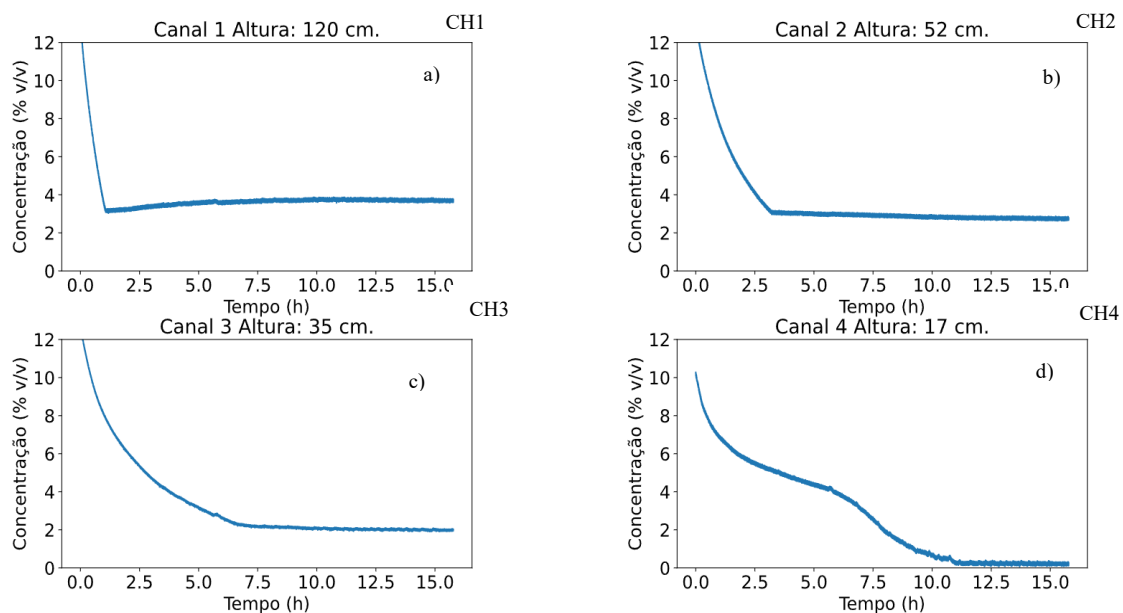


Figura 4.27. Dados de concentração volumétrica com 10% de calcita para os testes da Unidade de Bancada II. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2024.



Figura 4.28. Teste de sedimentação com calcita. Presença de fluido turvo e sedimento na base da coluna da Unidade de Bancada II. Fonte: AUTOR, 2024.

O canal 2 e 3 (CH2 e CH3) sedimentaram com a passagem da interface em aproximadamente 3 horas e 7 horas. Conforme as partículas migram para a base da coluna, a concentração volumétrica de sólidos nesses pontos de medição diminui progressivamente até atingir um platô de estabilização. Portanto é indicado que nessa região até o tempo de 15 horas de teste, as partículas sedimentaram e a taxa de sedimentação tendeu a zero. O ponto de estabilização mostra que a concentração de sólidos se aproxima de um valor constante, porém não chega a atingir a zero como o canal 1. O terceiro canal (CH4), é uma região de grande concentração de sólidos, então, observa-se que em até 5 horas de teste, a curva apresenta um declínio com uma inclinação característica. Após esse tempo, a curva muda sua inclinação adquirindo um abaulamento que pode ser por conta das interações entre as partículas nesse instante. Em seguida, ela adquire novamente uma tendência de sedimentação até zerar a concentração de sólidos. No entanto, essa concentração atingiu o valor zero devido ao fato de que o sedimento cobriu o sensor de pressão, interrompendo assim as medições.

O diferencial de pressão (Figura 4.29) dessa vez foi analisado entre CH1 e CH2, e CH2 e CH3, uma região maior de fluido. E é identificado inicialmente (CH1 e CH2) um declínio da curva, seguido por uma linearidade até ocorrer a passagem da interface. Em CH2 e CH3 tem-se um aumento de concentração de sólidos devido às migrações das

partículas para a base da coluna, e após 4 horas de teste, a diminuição da concentração é verificada. Em ambos os pares de canais não houve zero de concentração. Então, a técnica permitiu adquirir a variação das concentrações e o fenômeno da sedimentação.

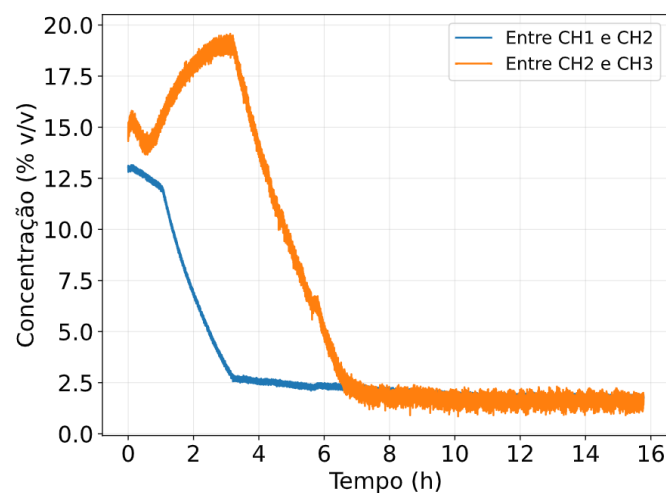


Figura 4.29. Curva de evolução por diferencial de pressão para a concentração volumétrica de 10% de calcita na Unidade de Bancada II. Fonte: AUTOR, 2024.

4.2.2.6 Concentração Volumétrica de 15% v/v de Calcita

Para os testes experimentais com concentrações volumétricas de 15% de calcita (Figura 4.30) o canal 1 (CH1) exibiu uma dinâmica de sedimentação esperada, para esta unidade. Em aproximadamente 4 horas de teste se visualiza uma queda da concentração de partículas sólidas adquirindo uma não linearidade apresentando a passagem da interface em aproximadamente 20 horas. Enquanto, para os canais próximos à base da coluna (CH3 e CH4), a dinâmica da sedimentação apresentou pequenas oscilações nas curvas. Essas, podem ser explicadas pelo comportamento das partículas sólidas e suas movimentações nessa região. Por conta da concentração maior de sólidos na parte inferior da coluna, existe uma interação mais intensa entre as partículas, o que pode explicar a presença das oscilações.

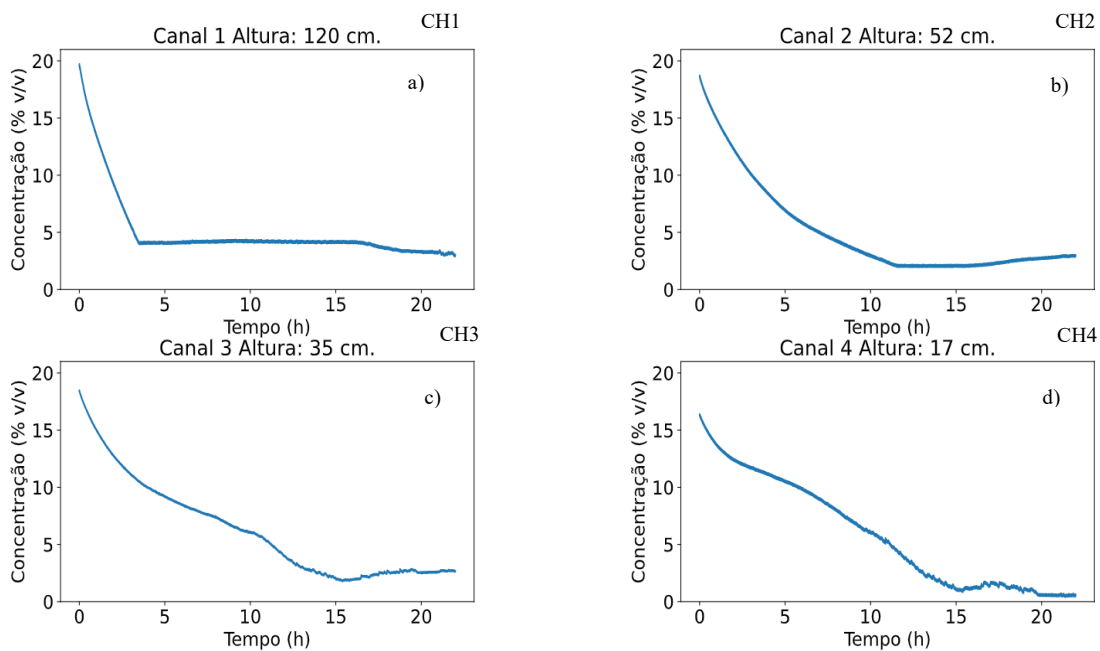


Figura 4.30. Dados de concentração volumétrica com 15% de calcita para os testes da Unidade de Bancada II. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2024.

O diferencial de pressão (Figura 4.31) mostrou que foi possível através da técnica de monitoramento por pressão, detectar a sedimentação para esse teste. Os medidores de pressão próximos ao topo (CH1 e CH2) detectaram a diminuição da concentração de sólidos pelo canal. Já para os pontos próximo a base da coluna (CH2 e CH3), no teste com calcita, ocorre um aumento da concentração volumétrica de sólidos com passagem da interface. A presença de oscilações nessa região é notável.

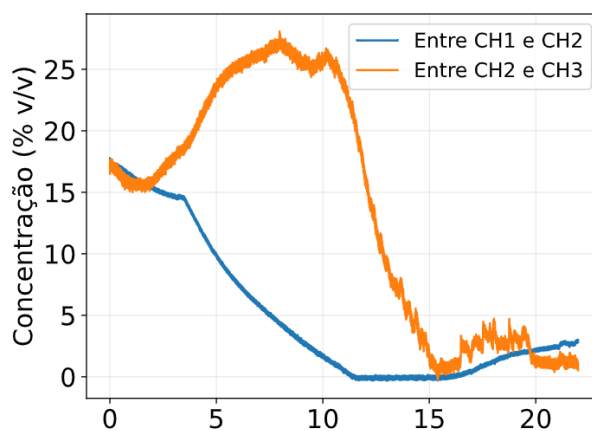


Figura 4.31. Evolução da concentração da curva de sedimentação por diferencial de pressão para a concentração volumétrica de 15% de calcita na Unidade de Bancada II. Fonte: AUTOR, 2024

4.2.2.7 Concentração de 20% v/v de Calcita

Para a concentração volumétrica de 20% de Calcita foi realizado um teste de 25 horas, cujo resultados experimentais são apresentados na Figura 4.32. No primeiro canal CH1, foi observado a diminuição da concentração volumétrica do sólido, embora não tenha atingido zero, devido à presença de material particulado na fase do clarificado, evidenciada pela cor turva do fluido, foi capaz de identificar a passagem da interface. A passagem da interface pela posição de medição ocorre aproximadamente às 7 horas de teste.

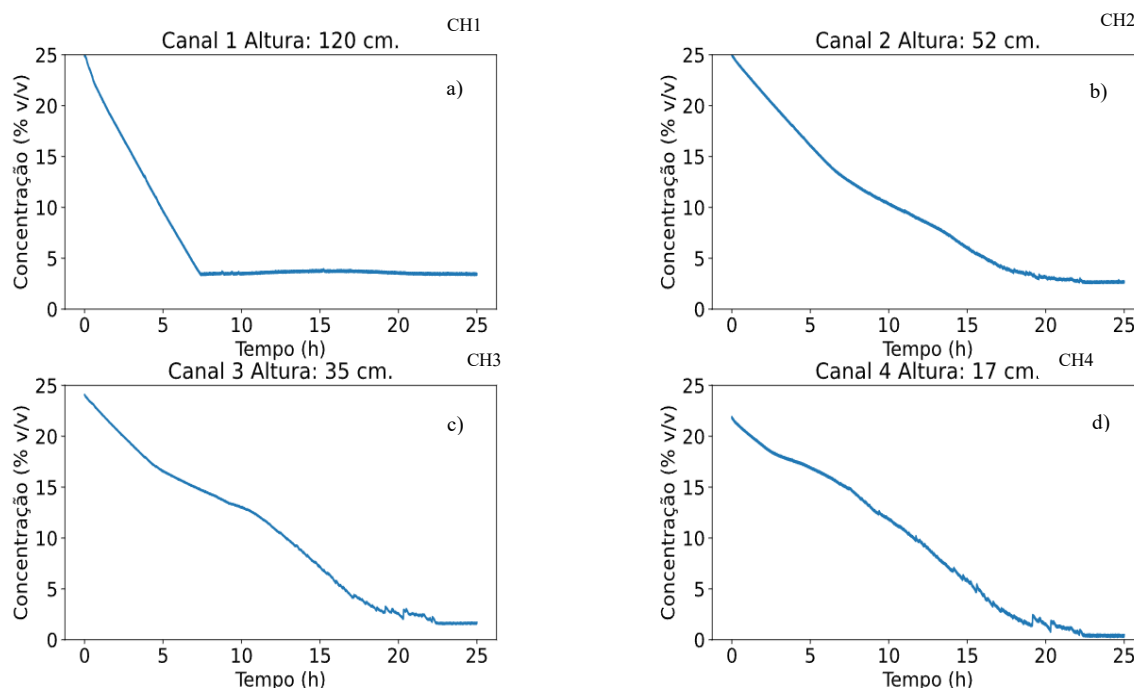


Figura 4.32. Dados de concentração volumétrica de 20% de Calcita na Unidade II de Bancada. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2024.

O canal 2 é visualizado a curva de sedimentação com passagem da interface em aproximadamente 20 horas. Para os canais 3 e 4 (CH3 e CH4), é visualizado uma dinâmica semelhante. Essa dinâmica é causada pela formação de material compactado que cobre os pontos de medição. Isso pode levar a uma interpretação equivocada de que a interface descendente já passou, quando na verdade isso não ocorreu. Quando o material compactado se acumula na parte inferior da coluna e cobre o sensor de pressão, as leituras

são interrompidas, pois o sensor não consegue mais adquirir dados fluidos e passa a detectar o meio poroso, conforme corroborado por Nocón (2010).

4.2.2.8 Comparação entre as concentrações para cada canal do teste com calcita

Durante o teste de sedimentação com calcita, nas concentrações volumétricas de 10%, 20% e 30%, foram realizadas comparações para compreender a sedimentação e a eficácia da técnica de monitoramento por pressão. A Figura 4.33 apresenta as comparações por canais. É possível observar que, no primeiro canal (CH1), em todas as concentrações, ocorreu a passagem da interface e a sedimentação foi identificada. A concentração não atinge zero devido à presença de partículas sólidas que deixam o líquido sobrenadante turvo. O Monitoramento por pressão conseguiu detectar esse fluido com presença de sólidos em todas as concentrações para o canal.

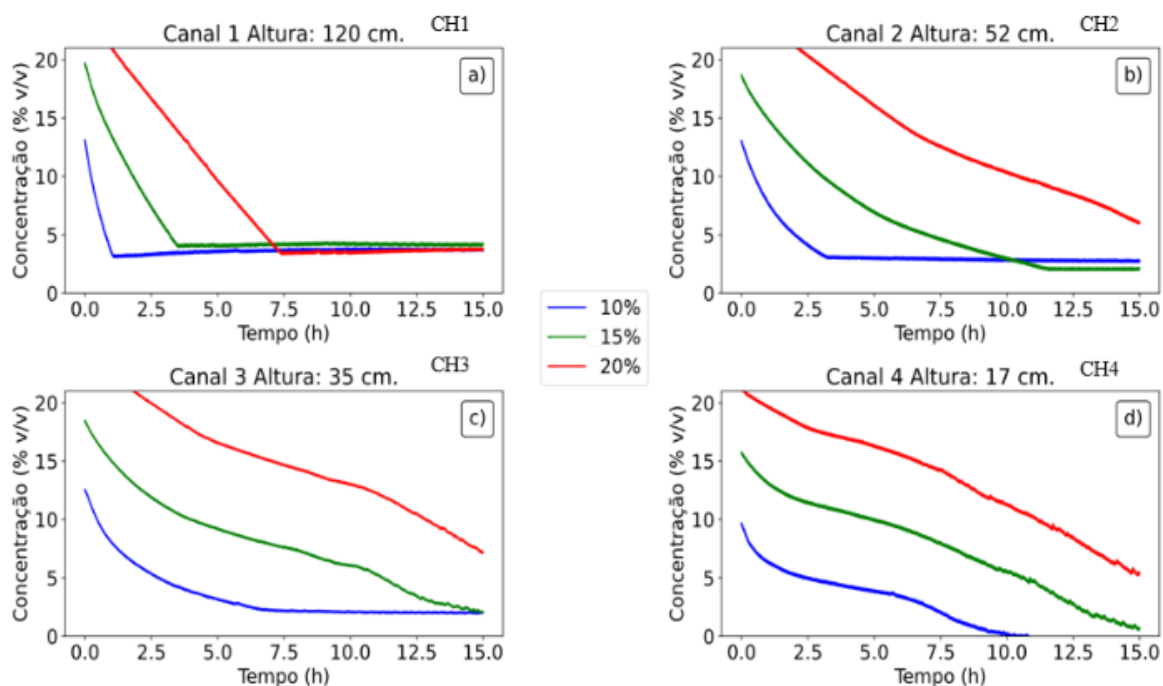


Figura 4.33. Curva de comparações do monitoramento da concentração volumétrica para 10%, 15% e 20% de calcita na Unidade de Bancada II. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2024.

No canal 2 (CH2), apenas na concentração menor de 10%, foi observada a dinâmica da sedimentação com a passagem da interface. Por outro lado, no canal 3, somente o fluido de menor concentração foi capaz de identificar a dinâmica da sedimentação com a passagem da interface. Nos canais da base, apenas a diminuição da concentração de sólidos foi aquisitada. No entanto, como observado em outras análises, ocorreu o cobrimento do sensor de pressão, o que interferiu na precisão da medição do transdutor.

É evidenciado que durante as comparações a concentração de sólidos desempenhou um papel crucial no estudo da sedimentação, pois influenciou diretamente na viscosidade do fluido. Como evidenciado no estudo reológico da calcita na seção de caracterização do material, observou-se que o comportamento reológico do fluido variava de acordo com a concentração de sólidos. Em particular, foi observado que para o fluido com comportamento levemente não newtoniano, a velocidade de sedimentação das partículas foi maior em comparação com o fluido que exibiu um comportamento mais pseudoplástico. Esta observação demonstra a influência significativa da reologia dos fluidos na sedimentação, afetando o comportamento das suspensões. Em outras palavras, os fluidos apresentaram um comportamento não newtoniano, adotando características de fluido pseudoplástico, o que pode ser atribuído à variação na concentração de sólidos.

Sendo assim para o estudo atual a concentração de sólidos foi um fator crucial para a reologia do fluido, pois, enquanto a concentração da suspensão aumenta, têm-se a resistência ao cisalhamento. Assim, a viscosidade aparente varia com o aumento da taxa de cisalhamento e com a concentração. De acordo com Boger *et al.* (2006), o aumento da concentração de sólidos tem relação com o aumento exponencial da tensão de cisalhamento limite. Assim, esse aumento explica a interação entre as partículas, ou seja, quanto maior a concentração de partículas no fluido, maior a possibilidade de colisões entre elas, resultando um aumento na resistência ao cisalhamento e na influência ao comportamento reológico.

4.2.2.9 Comparação entre as concentrações volumétricas de 10% de barita e calcita

É de suma importância compreender como os materiais adensantes influenciam a dinâmica da sedimentação. Pois as características e propriedades podem afetar o processo de várias maneiras. Como apresentado na Figura 4.34, a granulometria mostra ser um

fator essencial que explica essa influência, uma vez que partículas maiores e mais densas tendem a ter um impacto significativo no desempenho do processo, por possuírem uma maior velocidade Terminal de sedimentação. Já as partículas finas por terem um diâmetro menor tendem a permanecer na suspensão líquida. Suspensões muito concentradas apresentam características de sedimentação muito distintas, com impedimento para a ocorrência do fenômeno da sedimentação, gerando uma taxa de sedimentação não constante e tendendo a ser decrescente (FRANÇA; MASSARANI, 2004).

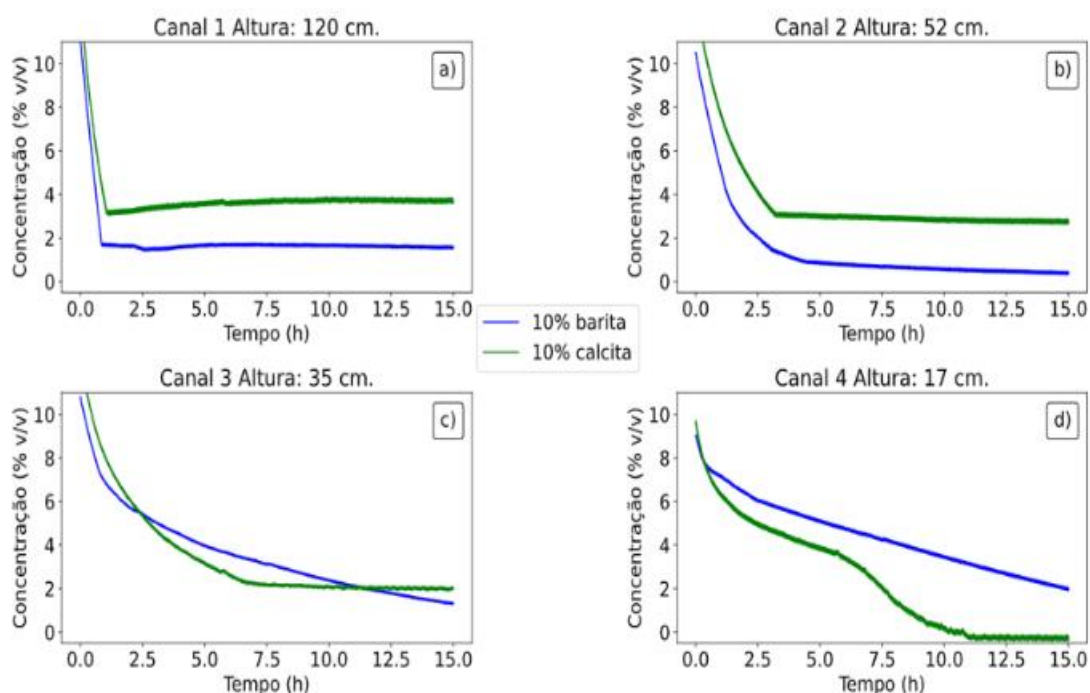


Figura 4.34. Comparações do monitoramento da concentração volumétrica de sólidos para os fluidos com 10% de calcita e barita na Unidade de Bancada II. Fonte: AUTOR, 2024.

Outro fator relevante é que a reologia assim como a granulometria exerce influência na sedimentação. A avaliação da reologia desempenha um importante papel no estudo da estabilidade de suspensões. Pois segundo a lei de Stokes, a viscosidade do sistema modifica a velocidade de sedimentação (STOKE, 1850). Segundo Vliet & Lyklema (2005), um fluido tem como classificação não-newtoniano quando a relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento não é linear. Nesse cenário, é possível determinar viscosidade aparente, para cada taxa de cisalhamento. As análises das curvas de fluxo mostraram as suspensões mais fluidas, variando a viscosidade aparente com o aumento

da taxa de cisalhamento. Notou-se que, à medida que a tensão de cisalhamento aumenta, como mostrado nos gráficos da curva de fluxo, a viscosidade aparente do fluido diminui progressivamente, o que é característico do comportamento pseudoplástico.

4.2.3 Unidade Piloto

4.2.3.1 Monitoramento da Concentração de Sólidos em Unidade Piloto

Com o objetivo de avaliar o processo de sedimentação e a transmissibilidade de pressão no sedimento, foi construída e testada uma unidade piloto com 4 m de altura. O aparato instrumental possui várias luvas laterais para inserção do transmissor de pressão. Os pontos de medição são denominados como canal 1 (CH1), localizado a 345 cm, o canal 2 (CH2) a 255 cm, o canal 3 (CH3) a 165 cm e o canal 4 (CH4) a 60. Além disso, a unidade possui válvulas de escoamento que permitem a saída do fluido, o que possibilita a coleta de amostras em dois pontos da coluna para obtenção de dados de concentração volumétrica com a finalidade de avaliar a homogeneidade da suspensão no início do teste.

A primeira fase do experimento consiste em validar a técnica de pressão por meio de testes realizados com a água. Em um período de 30 minutos, a água circulava pela coluna por meio bomba de deslocamento positivo helicoidal. Após esse tempo a água foi confinada no interior da coluna. A válvula automática responsável por controlar o fluxo (V4), localizada na base é fechada, assim como a que controla o mangote superior (V3), enquanto a do topo é aberta para a atmosfera (V1), a fim de evitar o aprisionamento no mangote e na coluna. Os testes iniciais, tiveram como objetivo obter dados de pressão em cada canal, com intuito de validar a técnica na unidade. Após um período de 50 horas, os dados coletados foram registrados no *software* desenvolvido para tal finalidade. De acordo com a Figura 4.35 é possível observar que, para uma massa específica da água equivalente a 1 g/cm^3 , há consistência em cada ponto de medição, com algumas variações de aproximadamente 5 mbar, observadas na Figura 4.36. Essas variações podem ter sido originadas dos efeitos atmosféricos, influenciando o sistema na precisão dos medidores, uma vez que, de acordo com o INPE, a pressão atmosférica varia precisamente 5 mbar na cidade de Seropédica, conforme a Figura 4.37. Além da pressão atmosférica, como já foi mencionado, a temperatura pode ter contribuído no comportamento e na precisão da

medição. Pois, a região de Seropédica passou por temperaturas altas durante o período da primavera e do verão. Então, é importante destacar que testes mais apurados serão realizados para validar de maneira concisa a informação mencionada.

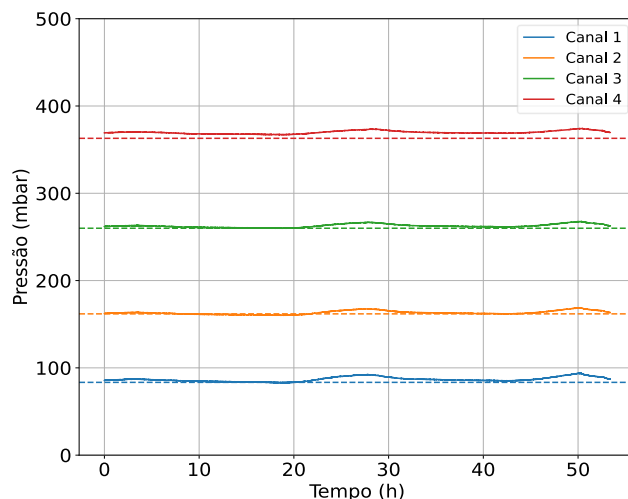


Figura 4.35. Curva de medidas de pressão da água para validação da investigação da técnica na Unidade Piloto. Fonte: AUTOR, 2024.

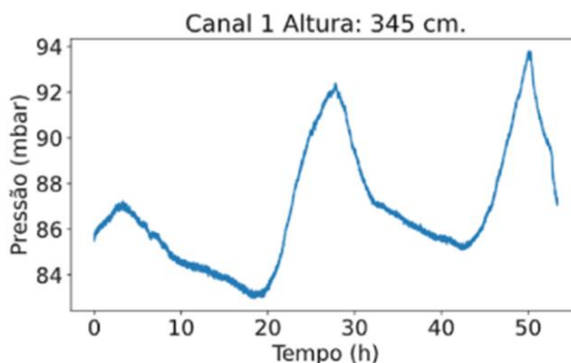


Figura 4.36. Imagem da aproximação do canal 1 que está localizado a 345 cm da base da coluna de sedimentação. Fonte: AUTOR, 2024.



Figura 4.37. Dados da pressão atmosférica em relação ao nível do mar emitido para a cidade de Seropédica, utilizado para a comparação dos testes com água, de acordo com o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Fonte: INPE, 2024.

Para a segunda fase dos testes experimentais, foi conduzido um teste preliminar (Figura 4.38) com 10% de concentração volumétrica de barita. Em todos os observou-se uma diminuição na concentração de sólidos. Todavia, no canal 1(CH1) a redução levou a negativar a concentração volumétrica, deixando-a abaixo de zero. Estudos estão sendo realizados para investigar por que essa concentração se tornou negativa. Isso destaca a complexidade do aparato experimental da Unidade Piloto, que requer um estudo mais aprofundado de seu funcionamento. Composta por vários equipamentos, é essencial compreender cada componente para operá-la adequadamente. Obtendo informações mais detalhadas mais detalhadas sobre o sistema, será possível entender melhor o comportamento do fluido presente nele.

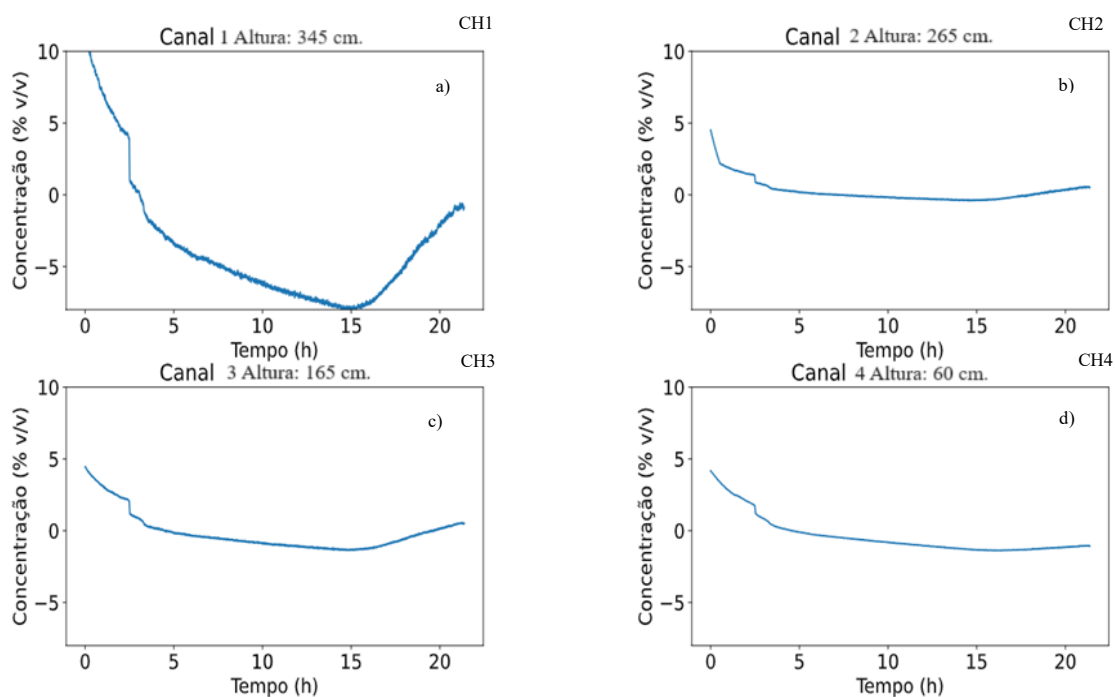


Figura 4.38. Curva de concentração volumétrica de 10% de barita na Unidade Piloto. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4. Fonte: AUTOR, 2024.

4.2.4.1 Transmissibilidade de Pressão

Para a medição da transmissibilidade de pressão, utilizou-se o ar comprimido no teste. O fluido manteve-se confinado para que a partícula sólida pudesse sedimentar, aproximadamente 7 dias. O experimento foi conduzido a uma concentração volumétrica de 10 % de barita. No topo da coluna, foi realizada uma manobra de troca de conexões,

com intuito de inserir o tubo pneumático que conduz o ar. Posteriormente, as válvulas automáticas responsáveis por controlar e interromper o fluxo de fluido foram fechadas, e o ar proveniente do compressor foi utilizado para pressurizar o sistema a uma pressão de 100 psi. Após a pressurização, a pressão, que estava constante após vários dias de sedimentação, respondeu rapidamente e aumentou de pressão em todos os canais, até a saturação do transmissor. Sendo detectado em todos os canais. A Figura 4.39 detalha o pico máximo de pressão ao longo do tempo e, após o sistema ser despressurizado, a pressão retorna, porém não alcança o valor inicial para o período de teste.

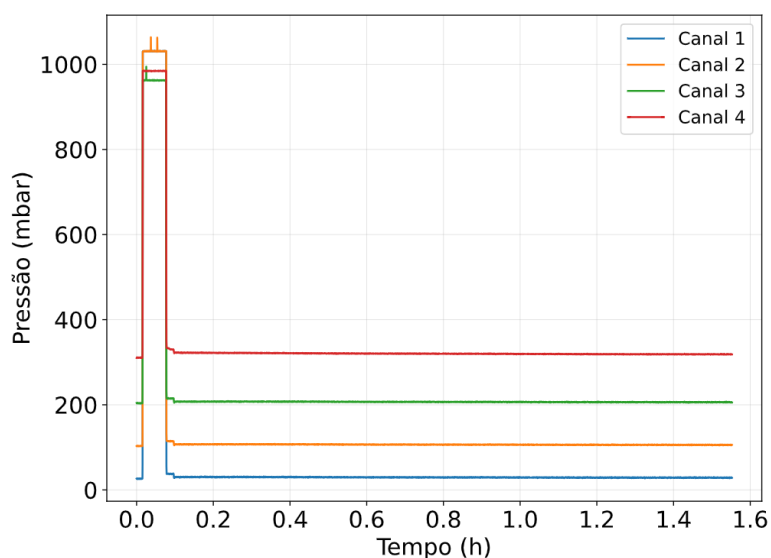


Figura 4.39. Dados da pressurização do sistema com o fluido confinado após 7 dias de sedimentação. Fonte: Autor, 2024.

Pela análise detalhada do gráfico anterior pode-se concluir que houve transmissibilidade de pressão por meio do sedimento formado na base da coluna de sedimentação. Para a concentração volumétrica de 10% de barita, estimou-se uma altura de 97,76 cm de sedimento. Com base nessa estimativa (tabela 4.1), entende-se que o sedimento cobriu o canal 4, que está localizado a 40 cm da base da coluna. A análise de pressão indicou que houve transmissibilidade por meio desse canal, sugerindo que o sedimento não impediu completamente o fluxo de pressão através dele. Isso evidencia a importância da compreensão do comportamento do sedimento na coluna de sedimentação e seu impacto na transmissão de pressão durante os testes de sedimentação.

Tabela 4.7 Dados específicos para estimação da altura do sedimento

Volume Coluna até Valvula (cm ³)	Concentração Volumétrica	Volume de Barita (cm ³)	Altura de sedimento (cm)
15479,91	10%	1547,99	97,76

Um segundo teste de transmissibilidade de pressão foi conduzido, para sedimentação de 10 dias. Os dados gráficos (Figura 4.40) indicam que, novamente, houve transmissibilidade de pressão através do sedimento, e a pressão retornou ao valor inicial após 8 horas de teste. Durante o teste, verificou-se se o escoamento pelo sedimento após a abertura da válvula inferior. Foi constatado que, de fato, o fluido é capaz de escoar pelo sedimento (Figura 4.41). Esse resultado destaca a capacidade do sedimento de permitir pelos seus canais o fluxo de fluido, identificando uma permeabilidade. Esse fluxo de fluido ocorreu após um período prolongado de sedimentação, o que pode ter implicações importantes no teste de transmissibilidade de pressão.

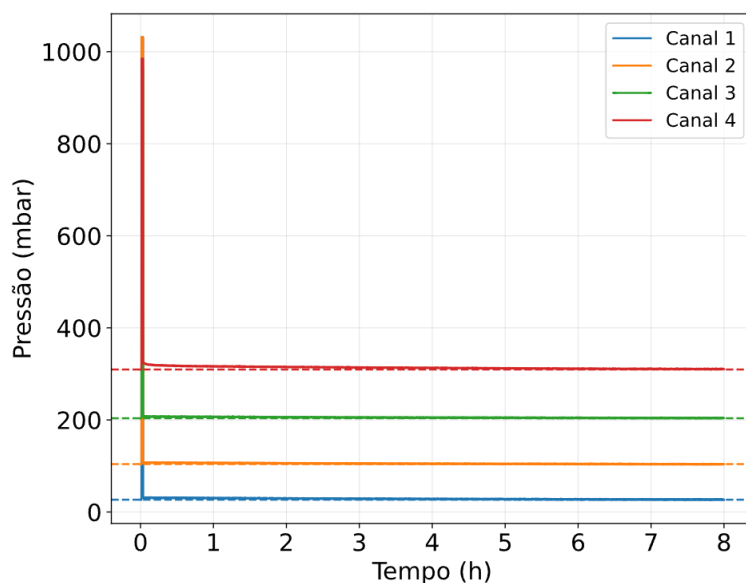


Figura 4.40. Dados da pressurização do sistema com o fluido confinado após 10 dias de sedimentação. Fonte: AUTOR, 2024.



Figura 4.41 Teste de transmissibilidade de pressão: a) válvula de escoamento de fluido localizado na base da coluna; b) resíduo do teste de escoamento. Fonte: AUTOR, 2024.

CAPÍTULO V

Resumo: O capítulo disponibiliza uma síntese de conclusões referentes ao monitoramento da sedimentação por meio da técnica por pressão, além de sugestões de trabalhos futuros.

5. CONCLUSÕES

A técnica de monitoramento da concentração de sólidos por meio da análise de pressão, mostrou-se eficaz por ter possibilitado avaliar a dinâmica da sedimentação de maneira qualitativa e quantitativa. Apesar das suspensões terem materiais adensantes diversificados, que em algumas vezes foi permitido a visualização do teste e outras não, em caso de fluidos opacos, os medidores de pressão revelaram ser um método eficiente para monitorar os perfis de concentração de sólidos ao longo do tempo. A técnica foi validada e evidenciada pela capacidade que o equipamento tem em adquirir medidas de pressão durante o processo de sedimentação.

Os testes preliminares, na Unidade I de Bancada, foram essenciais para o entendimento e a validação da técnica. Por ser uma metodologia inovadora, foi preciso um estudo detalhado sobre o funcionamento dos medidores de pressão e de que forma adquirem a sedimentação da partícula sólida. Inicialmente, a concentração volumétrica de 10%, a técnica detectou a migração das partículas para a região inferior da coluna de sedimentação, assim como a passagem da interface pelo ponto de medição, como descrito na literatura, por Coe e Clewenger (1916). Sendo assim, os resultados corroboraram com os desses autores, que apesar de ter realizado estudos em proveta conseguiu visualizar a queda da interface ao longo do tempo assim como a pesquisa atual. Para os testes com suspensões complexas, fluido 3, a técnica conseguiu detectar a sedimentação, porém, os fenômenos visualizados nos mais simples não foi detectado pela leitura de pressão, precisando prolongar o tempo de teste.

A Unidade de Bancada II, permitiu reproduzir a dinâmica de sedimentação visualizada e estudada na primeira unidade. Os testes de sedimentação mostraram a influência da concentração de sólidos e da reologia do fluido, assim como nos testes preliminares. Esses resultados são consistentes com as observações efetivadas nos testes preliminares, a qual a influência da concentração de sólidos e da reologia do fluido já

havia sido identificada no processo de sedimentação. Portanto, a análise dos testes obtidos na segunda unidade confirmou e ampliou o entendimento sobre os fatores afetam a dinâmica da sedimentação detectados pelos transdutores.

A investigação da sedimentação por análise da pressão mostrou que em concentrações elevadas a taxa de sedimentação é reduzida por conta da interação das partículas, influenciando no processo. Esse fenômeno é conhecido como efeito de população e foi identificado na literatura por Richardson e Zaki (1954). o Autor menciona que o fenômeno aumenta o coeficiente de arraste sobre as partículas a porosidade da suspensão diminui, causando um declínio na velocidade de sedimentação. Nesse sentido, a observação feita na pesquisa atual está alinhada com o que foi relatado na literatura pelo autor, fornecendo uma base sólida para compreender e interpretar os resultados de sedimentação estudados.

Transmissor localizado próximo à base das colunas, detectaram a presença de sólidos no fluido durante o processo de sedimentação. Porém, quando o sedimento atinge uma altura que ultrapasse o ponto de leitura do transmissor, este interrompe a realização das medições de pressão, como relatado por Nocón (2010). Assim que, o sedimento cobre o transmissor de pressão, a leitura de pressão exercida pela coluna de fluido é cessada. Então, o medidor detecta a pressão em um meio poroso, por isso não pode ser mais usado para nossos propósitos, pois não fornece as informações precisas.

A unidade Piloto permitiu avaliar a transmissibilidade de pressão pelo sedimento. Durante o teste de pressurização identificou uma saturação em todos os transmissores, indicando a presença de pressão na coluna. A partir da altura do sedimento formado na base da coluna, especificamente no canal 1, foi possível observar que, após 7 dias de sedimentação, ocorreu a transmissibilidade de pressão através do sedimento. Além disso, um teste de pressurização realizado após 10 dias de sedimentação revelou que o fluido teve a capacidade de fluir através do sedimento formado. No entanto, para o monitoramento da concentração de sólidos, um resultado adverso foi identificado, para o canal 1 a uma altura de 345 cm da base, a concentração volumétrica de partículas sólidas ficou negativa. Isso remete que por ser uma coluna robusta com conexões e equipamentos aderidos a ela é necessária uma investigação apurada para sanar a causa da problemática.

CAPÍTULO VI

6. TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere explorar a versatilidade da Unidade Piloto em suas diferentes configurações. Incluindo estudos na região anular, uma vez que a unidade tem capacidade para tal, assim como estudos envolvendo dois fluidos. Além disso, a investigação do perfil de temperatura, já que é possível inserir termopares na unidade. Sedimentação inclinada, já que a coluna pode admitir diversas angulações de inclinações. Também é de suma importância repetir os testes ao longo de vários dias e diversas concentrações para obter estudos em scale *up* adequada entre as colunas.

7. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

ADORJÁN, L. A. **A Theory of Sediment Compression, 11th International Mineral Congress**, Cagliari, Itália, 1975.

ANDRADE, G. M. P. **Avaliação de incertezas na modelagem de sedimentação de sólidos adensantes via técnicas de Monte Carlo e abordagem Bayesiana**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Engenharia Química, Seropédica, RJ, 2018.

API Specification 13A (Speac 13A) – **American Petroleum Institute, Specification for Drilling Fluid Materials**. Washington, 1993.

AROUCA, F. DE O. **Uma Contribuição ao Estudo da Sedimentação Gravitacional em Batelada**. 2007. 322 f. Tese-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

BOBROFF, S.; PHILLIPS, R. J. **Nuclear magnetic resonance imaging investigation of sedimentation of concentrated suspensions in non-Newtonian fluids**. *Journal of Rheology*, v. 42, n. 6, p. 1419-1436, 1998.

BOGER, D. V., SCALES, P. J., & SOFRA, F. **Rheological concepts**. In: JEWELL, R.J.; FOURIE, A.B., **Paste and Thickened Tailings-A Guide**. Perth, Australia: Australian Centre for Geomechanics, 2006, p 25-37.

BOURGOYNE, A.T., Jr., MILLHEIM, K.K., CHENEVERT, M.F.. and YOUNG, F.S., Jr., 1991. **Applied Drilling Engineering**. Soc. Pet. Eng., Richardson, Tex., 502 pp.

CALÇADA, L. A. et al. **Barite Sag and Its Impact On Annular Pressure Build Up Mitigation In Producing Offshore Wells**. Society of Petroleum Engineers. v. 181377-MS, p. 1-16, 2016.

CAMPOS, Lizabetha Fernanda Araújo. **Composição de Argila Bentoníticas para Utilização em Fluidos de Poços de Petróleo**. Campina Grande, 2007. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

CHAKRAVARTI, A.; DELL, C. C. **The Behaviour of Highly Flocculated Suspensions in Batch Tests**. *Powder Technology*, v. 3, p. 287–295, 1969.

CHANGES. **Powder Technology**, v. 198, n. 1, p. 167–174, 2010

CHHABRA E RICHARDSON, R. P.; RICHARDSON, J. F. **Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications**. 2. ed. Hungary, Ed.Butterworth Heinemann, 2008.

COE, H. S.; CLEVENGER, G. H. **Methods for Determining the Capacities of Slime-Settling Tanks**. *AIME Transactions*, v. 55, p. 356-384, 1916.

COMINGS, E. W. **Thickening Calcium Carbonate Slurries**. *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 32, n. 5, p. 663-667, Maio 1940

CONCHA, F.; BUSTOS, M. C. **Settling Velocities of Particulate Systems, 7. Kynch Sedimentation Processes: Continuous Thickening**. *International Journal of Mineral Processing*, v. 34, n. 1–2, p. 33–51, 1992.

CONCHA, F.; BUSTOS, M. C. **A Modification of the Kynch Theory of Sedimentation.** AIChE Journal, Concepción, v. 33, n. 2, p. 312-315, Fevereiro 1987.

CREMASCO, M. A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidodinâmicos.** Ed. Blucher, 2012.

DAMASCENO, J. J. R. ; HENRIQUE, H. M. ; MASSARANI, G. **Um modelo para a sedimentação não estacionária.** XIX ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, 1991.

DAUGAN, S. et al. **Sedimentation of Suspensions in Shear-Thinning Fluids.** Oil and Gas Science and Technology, v. 59, n. 1, p. 71–80, 2004.

d'ÁVILA, J. S. **Um Modelo Matemático para a Sedimentação.** COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 1978.

DINIZ, M. D. M. S. **Caracterização do comportamento reológico e determinação de propriedades termofísicas de polpa de manga Ubá.** 2009. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

DIXON, D. C. **Momentum-Balance Aspects of Free-Settling Theory. I. Batch Thickening.** Separation Science, v. 12, n. 2, p. 171-191, 1977

ELER, F. M. **Estudo da Sedimentação de Barita em Fluidos de Perfuração.** Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Engenharia Química, Seropédica, RJ, 2012.

ENGLAND. **Malvern Instruments Ltd. 1998,1999. MAN 0247: Operators Guide.** England, 2003, 108p

FAGUNDES, F. M. **Estudo da sedimentação de partículas em fluidos de perfuração pelo uso da técnica de atenuação de raios gama.** 2019. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

FARROW, J. B., FAWELL, P. D., JOHNSTON, R. R. M. e NGUYEN, T. B. (2000), **“Recent Developments in Techniques and Methodologies for Improving Thickener Performance”.** Chemical Engineering Journal, 80, 149-155.

FERGUSON, R; CHURCH, M. **A Simple Universal Equation for Grain Settling Velocity.** Journal of Sedimentary Research, 74(6): 933-937.

FITCH, B. **Sedimentation of Flocculent Suspensions: State of the Art.** AIChE Journal, v. 25, n. 6, p. 913-930, Novembro 1979.

FOUST, A. S et al. **Princípios das Operações Unitárias.** São Paulo: Ed. LTC, 1982.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos.** Editora LTC, 8ª Edição, Rio de Janeiro, RJ, 2014, 884 p.

FRANÇA, S.C.A. e CASQUEIRA, R G. **Ensaio de Sedimentação.** In: Luz, A. B., Sampaio, J. A. e Almeida, S. L. M. (Ed.). Tratamento de Minérios. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007, p. 406-407.

GALINDO-ROSALES, F. J.; RUBIO-HERNÁNDEZ, F. J. **Structural breakdown and build-up in bentonite dispersions.** Applied Clay Science, v. 33, n. 2, p. 109–115, 2006.

GAN, H.; CHANG, J.; FENG, J.; HU, H. **Direct Numerical Simulation of the Sedimentation of Solid Particles with Thermal Convection.** *Journal of Fluid Mechanics*, v. 481, n. 481, p. 385–411, 2003.

GUESLIN, B. et al. **Aggregation Behavior of Two Spheres Falling Through an Aging Fluid.** *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, v. 74, n. 4, p. 6–9, 2006.

HARRIS, C. C.; SOMASUNDARAN, P.; JENSEN, R. R. **Sedimentation of Compressible Materials: Analysis of Batch Sedimentation Curve.** *Powder Technology*, v. 11, n. 1, p. 75–84, 1975.

HORIBA, **Light scattering theory: Laser diffraction.** Apresentação, Horiba Ltd., 2007. MALVERN Panalytical Ltd, 2017.

KURENKOV, V. F., SHATOKHINA, E. V., LOBANOV, F. I. (2005), “**Sedimentation of Kaolin Suspension in the Presence of Praestol Anionic Flocculant and Aluminum Polyoxochloride and Sulfate Coagulants**”. *Russian Journal of Applied Chemistry*, Vol. 78, N°11, 1872-1875.

KYNCH, G. J. **A Theory of Sedimentation.** *Trans. Amer. Soc.*, p. 166-176, janeiro 1952.

LALI, A. M. et al. **Behaviour of Solid Particles in Viscous non-Newtonian Solutions: Settling Velocity, Wall Effects and Bed Expansion in Solid-Liquid Fluidized Beds.** *Powder Technology*, v. 57, n. 1, p. 39–50, 1989.

LOCKETT, M. J. & AL-HABBOOBY, H. M. 1973 **Differential settling of size of two-particle species in a liquid.** *Trans. Inst. Chem. Engrs.* Volume n° 51, 281-292.

MACOSCO, C.W. **Rheology: principles, measurements and applications.** WILEY-VCH

Publishers. New York. 568p. 1994.

MAHMOUD, H. et al. **Hole cleaning and drilling fluid sweeps in horizontal and deviated wells: Comprehensive review.** *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 186, n. September 2019, p. 106748, 2020.

MASSARANI, G.; TELLES, A. S. **Escoamento de Fluidos Não-Newtonianos na Vizinhança de Partículas Sólidas.** *Revista Brasileira de Física*, v. 8, n. 3, p. 550-561, 1978.

MESCHYAN, S.R. **Experimental Rheology of Clayey Soils.** *Balkema Publishers.* USA, 1995, 448P.

MICHELE, J.; PATZOLD, R.; DONIS, R. **Alignment and aggregation effects in suspensions of spheres in non-Newtonian media.** *Rheologica Acta*, v. 16, 1977.

MOOLMAN, P. L. **Rheological model for paint properties.** Stellenbosch, 2008. 384 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade de Stellenbosch, Stellenbosch, 2008.

MORA, S.; TALINI, L.; ALLAIN, C. **Structuring sedimentation in a shear-thinning fluid.** *Physical Review Letters*, v. 95 n° 088301, p. 1-4, 2005.

MORAES JR., D. (1998). **Fundamentos de Operações Unitárias: Projeto Básico e Seleção de Equipamentos de Indústrias Químicas.** São Carlos: UFSCar/DEQ, p. 07 – 92.

MOREIRA, B. A.; AROUCA, F. O.; DAMASCENO, J. J. R. **Analysis of suspension sedimentation in fluids with rheological shear-thinning properties and thixotropic effects.** Powder Technology, vol. 308, p 290-297, 2016.

NASCIMENTO, C. R. **Ensaio em reômetro rotacional tipo cilindros coaxiais.** Universidade Federal do Rio de Janeiro: CETEM/MCT, RJ, 2007.

NGUYEN, T.; MISKA, S.; YU, M.; TAKACH, N. **Predicting dynamic barite sag in newtonian oil based drilling fluids.** SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2009.

NOCON, W. **Practical Aspects of Batch Sedimentation Control Based on Fractional Density Changes.** Powder Technology, v. 198, n. 1, p. 167–174, 2010.

NUNES, J. F. **Estudo de Sedimentação Gravitacional de Suspensões Floculentas.** Universidade Federal de Uberlândia. Pós-Graduação em Engenharia Química, Uberlândia, MG, 2008.

OMLAND, T. H.; SAASEN, A.; VAN DER ZWAAG, C.; AMUNDSEN, P. A. **The Effect of Weighting Material Sag on Drilling Operation Efficiency.** Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. 30 October-1 November, Jakarta, Indonesia. 2007.

PASQUINI M. A., ARAÚJO C. C. S., FIGUEIREDO M. de M. F., Mazza R. A. **Estudo da sedimentação da mistura baritina e água em anular de produção utilizando medidores de pressão diferencial e modelo teórico simplificado.** Flow and Research Laboratory - Centro de Estudos de Energia e Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, Rua Cora Coralina, 350, Campinas-SP, 13083-896, Brasil.

PEÇANHA, R.P. **Operações unitárias envolvendo partículas e fluidos.** Editora Elsevier, 2014.

PINTO, A. A. R. **Modelagem e Simulação do Fenômeno de Sedimentação de Sólidos Adensantes em Suspensões Não Newtonianas Confinadas em Regiões Anulares Sob Condições Não Isotérmicas.** Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Engenharia Química, Seropédica, RJ, 2020.

PLÁCIDO, J. C. R., 2009, **Colunas de perfuração de poços de petróleo.** (Apresentação em slides) Rio de Janeiro RJ, Brasil.

POSSA, M. V. **Reologia no Tratamento de Minério,** 2004. Rio de Janeiro: CETEM/MCT – (Série Tecnologia Mineral, 13).

CASTOR JR, C. A., Fialho, A. I. D. A., Oechsler, B. F., & Pinto, J. C.. **Multivariable Rheological Models for Commercial Polypropylene with High Molar Masses.** Macromolecular Reaction Engineering, v. 17, n. 4, p. 2300008, 2023.

RIBEIRO JÚNIOR, J. M. **Modelagem e Simulação da Sedimentação de Sólidos Adensantes em Fluidos de Perfuração.** Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Engenharia Química, Seropédica, RJ, 2016.

RICHARDSON, J. F.; ZAKI, W. N. **Sedimentation and Fluidisation: Part I.** Trans. Instn Chem. Engrs, v. 32, p. 82–100, 1954.

ROCHA, R. R. **Estudo Teórico-Experimental da Sedimentação em Batelada: Monitoramento e Modelagem de Perfis de Concentração de Sólidos e Análise de**

Equações Constitutivas. 2018. 115 f. Dissertação-Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2018.

ROCHA, R. R. et al. **Settling of Weighting Agents in non-Newtonian Fluids to off-Shore Drilling Wells: Modeling, Parameter Estimation and Analysis of Constitutive Equations.** Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 184, 2020.

SCHRAMM, G. A. **A Practical Approach to Rheology and Rheometry.** Haake, 1994.

SCOTT, K. J. **Experimental Study of Continuous Thickening of a Flocculated Silica Slurry.** Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals, v. 7, n. 4, p. 582–595, 1968.

SHIRATO, M. et al. **Analysis of Settling of Thick Slurries due to Consolidation.** JOURNAL of CHEMICAL ENGINEERING of JAPAN, v. 3, n. 1, p. 98–104, 1970.

SILVA, K. C. **Estudo da filtração com e sem sedimentação prévia de fluidos de perfuração com comportamentos Newtonianos e Não-Newtonianos.** Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Engenharia Química, Seropédica, RJ, 2017.

STOKES, G. G. **On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums.** Trans. Cambridge Philos. Soc. 9, v. 9, p. 1-86, 1850.

TEHRANI, S. C. A, CASQUEIRA, R. G. **“Ensaios de Sedimentação”.** Comunicação Técnica Elaborada para o Livro Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais, Parte VI – Desaguamento, cap. 23, pág. 393 – 408, Rio de Janeiro Brasil, 2007.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo 2. ed.** Interciencia, 2004.

THOMAS, José Eduardo. **Fundamentos da engenharia de petróleo.** 2º Edição. Editora Interciência. 2001. Rio de Janeiro. PETROBRAS.

TILLER, F. M. **Revision of Kynch Sedimentation Theory.** AIChE Journal, v. 27, n. 5, p. 823-829, setembro 1981.

TILLER, F. M.; LEU, W. **Basic Data Fitting in Filtration.** Journal of the Chinese Institute of Engineers, v. 11, n. 2, p. 64–70, 1980.

VARGO JR., R.F.; PAYNE, M.; FAUL, R.; LEBLANC, J.; GRIFFITH, J.E. (2003), **“Practical and Successful Prevention of Annular Pressure Buildup on the Marlin Project”**, SPE Drill. Completion, Vol 18, p.228 234.

VLIET, T. V.; LYKLEMA, H. **Fundamentals of interface and colloid science.** Elsevier, v. IV, p. 6.1-6.88, 2005.

WILLIAMS, R. A. et al. **Experimental Techniques for Monitoring Sedimentation in Optically Opaque Suspensions.** Colloids and Surfaces, v. 43, p. 1-32, 1990.

ZAMORA, M.; BELL, R. **Improved wellsite test for monitoring barite sag.** AADE Drilling Fluids Technical Conference. Houston, Texas, USA, 2004.

8. ANEXOS

8.1 Desafios operacionais

Para a Unidade Experimental em contexto, a sua construção e a operação dos testes experimentais, por ser uma escala maior, apresentou desafios significantes. Este aparato experimental foi dimensionado para lidar com volumes maiores de fluidos e operar condições diferentes que exigiram um cuidado extra. Composta por equipamentos, dispositivos e configurações específicas, a montagem exigiu um estudo mais aprofundado acerca dos desafios encontrados. Abaixo segue um checklist detalhado das medidas tomadas para mitigar os desafios.

- ✓ Instalação de cabos, transmissores diferenciais de pressão, termopares, válvulas;
- ✓ Verificação de vazamentos;
- ✓ Soldagem de juntas para sanar vazamentos;
- ✓ Sistema de cordas e roldanas para manejo e segurança da coluna;
- ✓ Instalação dos novos transmissores de pressão manométricos;
- ✓ Substituição da bomba para uma que fornecesse a vazão adequada;
- ✓ Substituição dos mangotes para mangotes com suporte a alta pressão;
- ✓ Remoção do tubo interno para evitar o tamponamento por barita;
- ✓ Ajuste nas ligações elétricas dos transmissores de pressão;
- ✓ Validação com água por 2 horas;
- ✓ Manobra de válvulas e mangotes para evitar acúmulo de ar no interior da coluna;
- ✓ Substituição das reduções dos transdutores para evitar tamponamento por barita;
- ✓ Instalação do sistema de descarte com válvula manual e mangote dedicados;
- ✓ Instalação de válvulas manuais na base e no topo da coluna para coleta de amostras e controle da altura de coluna de fluido;
- ✓ Nova manobra de válvulas para evitar acúmulo de ar na coluna;
- ✓ Validação com água por 50 horas.